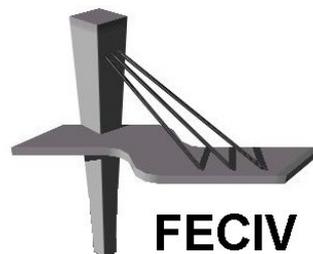




UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS
CINÉTICOS DA FLOCULAÇÃO COM
UTILIZAÇÃO DE TÉCNICA DE ANÁLISE
POR IMAGEM**



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Ricardo Henrique de Andrade Dutra

**OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS CINÉTICOS DA
FLOCULAÇÃO COM UTILIZAÇÃO DE TÉCNICA DE
ANÁLISE POR IMAGEM**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

Uberlândia, (17/08/2017)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

D978o
2017 Dutra, Ricardo Henrique de Andrade, 1985-
 Obtenção dos parâmetros cinéticos da floculação com utilização de
 técnica de análise por imagem / Ricardo Henrique de Andrade Dutra. -
 2017.
 91 f : il.

Orientador: André Luiz de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Floculação - Teses. 3. Análise de
imagem - Teses. 4. Tratamento de águas para abastecimento - Teses. I.
Oliveira, André Luiz de. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ATA Nº: 194/2017

CANDIDATO: Ricardo Henrique de Andrade Dutra **Nº. Matrícula:** 11512ECV009

ORIENTADOR: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

TÍTULO: "Obtenção dos parâmetros cinéticos da floculação com utilização de técnicas de análise por imagem".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

PROJETO DE PESQUISA: Tratamento convencional e avançado de Água de Abastecimento e Residuária

DATA DA DEFESA: 30 de agosto de 2017

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y.

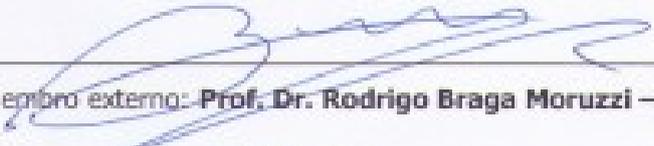
HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 9:00 - 11:00

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **Carlos Eugênio Pereira – FECIV/UFU; Rodrigo Braga Moruzzi – IGCE/UNESP e André Luiz de Oliveira – FECIV/UFU** orientador do candidato. Ressalta-se que o **Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi** participou da defesa por meio de vídeo conferência desde a cidade de Rio Claro/SP e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. André Luiz de Oliveira** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato APROVADO. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.



Professor Orientador: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira – FECIV/UFU



Membro externo: Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi – IGCE/UNESP



Membro interno: Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira – FECIV/UFU

Uberlândia, 30 de Agosto de 2017.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

A esta universidade, seu corpo docente, em especial ao meu orientador, Prof. Dr. André Luiz de Oliveira pela orientação, apoio e todo ensinamento compartilhado.

Aos meus companheiros de projeto Luan Serafim Mendes Gonçalves e Yuri Cardoso Mendes pela parceria e por todos momentos vividos ao longo do mestrado.

A Aline Martins Pinheiro, técnica do laboratório de saneamento, por toda paciência e ensinamento.

Aos membros da banca de qualificação pela disposição e conselhos para o aperfeiçoamento do presente trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

Este trabalho teve como propósito avaliar a influência das partículas de primeira classe no acompanhamento da floculação, simulada em equipamento de bancada *Jartest* para água de baixa turbidez utilizando sulfato de alumínio, cloreto férrico e policloreto de alumínio como coagulantes. Para acompanhamento da floculação e obtenção das curvas de Distribuição de Tamanho de Partículas (*DTP*) e seus parâmetros representativos, foi utilizada a técnica de análise de imagens dos flocos obtidas por câmera digital a partir de plano de luz laser. A *DTP* foi distribuída em 16 classes de tamanho sendo a primeira classe, considerada na premissa deste trabalho, como representativa das partículas primárias. Para avaliação da influência das partículas de primeira classe no desempenho da floculação foram investigados diferentes valores de gradiente médio de velocidade (G) (20, 30, 40 e 80 s^{-1}) para diversos tempos de floculação. Os resultados obtidos foram avaliados com base na cinética da floculação por meio das constantes de agregação (K_A) e ruptura (K_B) e na *DTP*, tendo como parâmetro de controle o diâmetro médio dos flocos. Em geral, observou-se que com o aumento do G houve uma diminuição da eficiência de floculação e que a tendência de equilíbrio entre K_A e K_B ocorreu nos primeiros minutos do processo. Os valores de K_A e K_B encontrados são muito semelhantes aos obtidos utilizando-se a metodologia clássica que considera turbidez remanescente para medida indireta da eficiência de floculação, portanto, a utilização do número de partículas da primeira classe de tamanho, pode ser apropriada.

Palavras-Chave: Floculação, distribuição do tamanho de partículas, agregação e ruptura, análise de imagem, água de baixa turbidez.

ABSTRACT

The purpose of this work was to evaluate the influence of first class particles in flocculation monitoring, simulated on Jarrest stand equipment for low turbidity water using aluminum sulfate, ferric chloride and aluminum polychloride as coagulants. To follow the flocculation and obtain the particle size distribution curves (*DTP*) and their representative parameters, the technique of image analysis of the flocs obtained by digital camera from the laser light plane was used. The *DTP* was distributed in 16 size classes, being the first class, considered in the premise of this work, as representative of the primary particles. To evaluate the influence of first-class particles on flocculation performance, different values of mean velocity gradient (G) (20, 30, 40 and 80 s^{-1}) were investigated for different flocculation times. The results obtained were evaluated based on the kinetics of flocculation by means of the aggregation constants (K_A) and rupture (K_B) and in the *DTP*, having as control parameter the average diameter of the flocs. In general, it was observed that with the increase of G there was a decrease in the flocculation efficiency and that the tendency of equilibrium between K_A and K_B occurred in the first minutes of the process. The values of K_A and K_B founded are very similar to those obtained using the classical methodology which considers remaining turbidity for indirect measurement of flocculation efficiency, therefore, the use of the number of particles of the first size class may be appropriate.

Keywords: Flocculation, particle size distribution, aggregation and rupture, image analysis, low turbidity water.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

SÍMBOLOS

A - área do floco representada na imagem (mm^2).

A - área do floco em dimensão 2D.

A - coeficiente de densidade da equação de potência.

β - coeficiente de inclinação da equação de potência.

cm - Unidade de medida (centímetro).

d_a - diâmetro aritmético (mm).

d_i - diâmetro da partícula i (mm).

d_{32} - diâmetro de Sauter.

d_g - diâmetro médio log-geométrico.

d - diâmetro equivalente do floco (mm).

d_m - diâmetro médio de flocos (mm).

D_b - diâmetro fractal limite.

D_f - Dimensão Fractal.

dN - Concentração do número de partículas em termos da variação incremental dos diâmetros das partículas.

$d_{(dp)}$ - Variação incremental dos diâmetros das partículas.

(dp) - diâmetro da partícula.

d_i - diâmetro médio geométrico da faixa de diâmetro i .

d_{i+1} - diâmetro médio geométrico da faixa de diâmetro $i+1$.

d_1 - tamanho médio dos flocos antes da quebra.

d_2 - tamanho dos flocos após o período de quebra.

d_3 - tamanho dos flocos após o recrescimento.

E - Erro de Limiarização.

E - Erro de Resolução.

E - Erro de Amostragem.

$\Delta(dp)$ - variação do diâmetro de partícula.

F_{dp} - Função para definir a frequência de distribuição das partícula

FF - Fator Força dos flocos.

FR - Fator de Recuperação dos flocos.

G – Gradiente de velocidade médio de flocculação (s^{-1}).

G_{mr}: gradiente médio de mistura rápida (s^{-1}).

K_A - Constante cinética de agregação.

K_B - Constante cinética de ruptura (s).

k - representa o número de flocos detectados na imagem.

L – Litro.

L_{máx} – Leitura máxima do parâmetro.

L_{mín} – Leitura mínima do parâmetro.

μm - Unidade de medida (micrometro).

mm - Unidade de medida (milímetro).

min – minutos.

MW - *Mega Watts*.

N₀ - número inicial de partículas primárias antes da flocculação após longo período de sedimentação (medido em termos de turbidez inicial da água – uT).

N - número de partículas primárias após o tempo *T* de flocculação e após longo período tempo de sedimentação (medido em termos de turbidez inicial da água – uT).

N – Número de partículas medidas.

n – número total de partículas medidas.

n_i - número de partículas de diâmetro representativo *d_i*.

n_i d_i³ - volume das partículas.

n_i d_i² - área das partículas.

ΔN – variação do número de partículas.

P - perímetro do floco.

rpm - rotação por minuto.

s – segundos.

s⁻¹ - 1/segundos.

T – Tempo de flocculação (s)

T_{mr} - Tempo de mistura rápida (s).

SIGLAS

AH - Ácido Húmico

CF – Cloreto Férrico

DTP - Distribuição do Tamanho de Partículas

ETA - Estação de Tratamento de Água

PAC – Policloreto de Alumínio

PIV - Imagem de Velocidade de Partículas

pH - Potencial Hidrogeniônico

SA - Sulfato de Alumínio

uT - Unidade de Turbidez

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
3.1	COAGULANTES QUÍMICOS.....	17
3.2	COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO	18
3.3	CARACTERÍSTICAS DOS FLOCOS.....	28
3.3.1	<i>Formação, quebra e reformação dos flocos.....</i>	<i>28</i>
3.3.2	<i>Distribuição do tamanho de partículas (DTP)</i>	<i>32</i>
3.4	ANÁLISE E TRATAMENTO DE IMAGENS	38
4	METODOLOGIA.....	41
4.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	43
4.2	OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS CINÉTICOS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PARTÍCULAS DA PRIMEIRA CLASSE DE TAMANHO.....	44
4.2.1	<i>Preparo das amostras.....</i>	<i>44</i>
4.2.2	<i>Ensaio de Coagulação.....</i>	<i>44</i>
4.2.3	<i>Estudo do processo de floculação</i>	<i>45</i>
4.3	PROCESSAMENTO E ANÁLISE DAS IMAGENS DIGITAIS.....	49
4.3.1	<i>Captura das Imagens.....</i>	<i>49</i>
4.3.2	<i>Tratamento de Imagens</i>	<i>51</i>
4.3.3	<i>Erros da metodologia adotada</i>	<i>53</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1	PROCESSAMENTO E ANÁLISE DAS IMAGENS DIGITAIS.....	56
5.1.1	<i>Tratamento das imagens digitais.....</i>	<i>56</i>
5.1.2	<i>Erros da metodologia adotada</i>	<i>57</i>
5.2	OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS CINÉTICOS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PARTÍCULAS DA PRIMEIRA CLASSE DE TAMANHO.....	62
5.2.1	<i>Ensaio de Coagulação.....</i>	<i>62</i>
5.2.2	<i>Determinação da DTP e separação das partículas da primeira classe de tamanho.....</i>	<i>65</i>
5.2.3	<i>Obtenção das constantes cinéticas de agregação e ruptura para as partículas de primeira classe</i>	
	<i>71</i>	
6	CONCLUSÕES.....	84

7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
8	REFERÊNCIAS.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Coagulação com Sulfato de Alumínio.....	19
Figura 2 - Agregação de partículas e métodos	20
Figura 3 – Aplicação da Equação 1 para os dados obtidos à velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min, $K_A = 2,74.10^{-4} \pm 2,02.10^{-6}$ e $K_B = 1,41.10^{-6} \pm 8,76.10^{-8}$ para intervalo de confiança de 95%. Os pontos em destaque correspondem aos valores de GT de 7200.....	23
Figura 4- Modificação do modelo clássico da cinética de floculação de Argaman e Kaufman (1970) proposta por Marques e Ferreira Filho (2016).....	27
Figura 5 – Diagrama esquemático da variação da atividade dos flocos na formação e processo de quebra.....	32
Figura 6 – Representação de uma imagem digital.....	39
Figura 7 – Etapas do processamento digital de imagens	40
Figura 8 – Fluxograma dos processos envolvidos na análise de imagens digitais	41
Figura 9- Fluxograma dos processos envolvidos no ensaio de floculação.....	42
Figura 10- Fluxograma dos processos envolvidos no estudo do processo de floculação.....	42
Figura 11 – Parâmetros geométricos da seção transversal de um floco	47
Figura 12 – Instalação do equipamento para aquisição das imagens	50
Figura 13 – Imagens capturadas dos flocos formados para G igual a 20 s^{-1} e G igual a 60 s^{-1} com tempo de floculação (T) de 60 minutos para o sulfato de alumínio como coagulante	56
Figura 14 – Imagens capturadas dos flocos formados para G igual 20 s^{-1} e G igual 60 s^{-1} com tempo de floculação (T) de 60 minutos para o sulfato de alumínio como coagulante, após processamento no Image Tools	57
Figura 15 – Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio para velocidade de sedimentação de $2,5\text{ cm.s}^{-1}$	63
Figura 16 – Diagrama de coagulação do cloreto férrico para velocidade de sedimentação de $2,5\text{ cm.s}^{-1}$	64
Figura 17 - Diagrama de coagulação do PAC para velocidade de sedimentação de $2,5\text{ cm.s}^{-1}$	64
Figura 18 – Distribuição do tamanho de partículas obtidas para G de 20 s^{-1} com T de 60min e G de 60 s^{-1} com T de 20min	67

Figura 19 - Aplicação da Equação 1 para número de partículas de primeira classe, $K_A = 4,09 \times 10^{-4} \pm 1,15 \times 10^{-4}$ e $K_B = 4,24 \times 10^{-6} \pm 1,35 \times 10^{-6}$ para intervalo de confiança de 95% e sulfato de alumínio como coagulante.	75
Figura 20 - Aplicação da Equação 1 para número de partículas de primeira classe, $K_A = 6,36 \times 10^{-4} \pm 2,15 \times 10^{-4}$ e $K_B = 3,13 \times 10^{-6} \pm 1,20 \times 10^{-6}$ para intervalo de confiança de 95% e cloreto férrico como coagulante.	76
Figura 21 - Aplicação da Equação 1 para número de partículas de primeira classe, $K_A = 4,11 \times 10^{-4} \pm 2,54 \times 10^{-4}$ e $K_B = 2,33 \times 10^{-6} \pm 1,74 \times 10^{-6}$ para intervalo de confiança de 95% e policloreto de alumínio como coagulante.	77
Figura 22 – Influência dos coagulantes na eficiência de floculação para o G de 20 s^{-1}	80
Figura 23 - Aplicação da Equação 1 com os dados apresentados na Tabela 12, para intervalo de confiança de 95% e sulfato de alumínio como coagulante.	81
Figura 24 - Aplicação da Equação 1 com os dados apresentados na Tabela 13, para intervalo de confiança de 95% e cloreto férrico como coagulante.	82
Figura 25 - Aplicação da Equação 1 com os dados apresentados na Tabela 14, para intervalo de confiança de 95% e PAC como coagulante.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos realizados no grupo de pesquisa	14
Tabela 2 - Constantes de agregação (K_A) e ruptura (K_B)	24
Tabela 3 - Valores de K_A e K_B para valores de velocidade de sedimentação de $2,5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$..	26
Tabela 4- Erro de resolução da imagem	58
Tabela 5 - Erro de Limiarização, considerando observações isoladas de três indivíduos.....	59
Tabela 6 – Erro Amostral para os três coagulantes utilizados no estudo e para todos os valores de G	61
Tabela 7 – Ensaio de coagulação.....	62
Tabela 8 – Classes de tamanho das partículas.....	66
Tabela 9 – Relação da quantidade de partículas primárias pelo tempo de floculação para o sulfato de alumínio como coagulante.	68
Tabela 10 - Relação da quantidade de partículas primárias pelo tempo de floculação para o cloreto férrico como coagulante.	69
Tabela 11- Relação da quantidade de partículas primárias pelo tempo de floculação para o Policloreto de Alumínio como coagulante.	70
Tabela 12 – Constantes cinéticas de agregação (K_A) e ruptura (K_B).....	72
Tabela 13 – Constantes Cinéticas de agregação (K_A) e ruptura (K_B) para o Sulfato de Alumínio	72
Tabela 14 – Constantes Cinéticas de agregação (K_A) e ruptura (K_B) para o Cloreto Férrico ..	73
Tabela 15 – Constantes Cinéticas de agregação (K_A) e ruptura (K_B) para o PAC	73

1 INTRODUÇÃO

O crescimento desordenado das cidades e a ocupação de áreas próximas de rios e mananciais contribuíram para a contaminação da água e para consequente diminuição da disponibilidade de tal recurso. Tanto que, atualmente, pode-se admitir que o tratamento de água muitas vezes se trata do pós tratamento de efluentes, visto que o corpo receptor de uma localidade pode ser o mesmo manancial para abastecimento de outra.

Diante dessa conjuntura, a escolha do tipo de tratamento é determinante para atender ao padrão de potabilidade exigido pela legislação vigente no país. Para que tal escolha seja assertiva, há necessidade da realização de análises e exames representativos em um determinado intervalo de tempo, que também contribuem para determinação das etapas posteriores.

No sistema convencional de tratamento, os processos de coagulação e floculação desempenham papel fundamental na remoção de partículas e coloides presentes na água. Nessas unidades ocorrem mudanças significativas na distribuição do tamanho de partículas (*DTP*) necessárias para aumento da eficiência de remoção nos processos subsequentes do tratamento. A falta de conhecimento dos fatores que influenciam no processo de coagulação, como dosagens de coagulante e pH, tempo e velocidade de sedimentação, compromete, bruscamente, o desempenho das ETAs (DI BERNARDO et al., 2003; JARVIS et al., 2005; XU et al.,2011; XIAO et al.,2011; REN et al., 2016).

A floculação ocorre sob os efeitos de agregação e ruptura. A agregação é resultado dos encontros das partículas desestabilizadas, sendo que a agitação promove uma maior taxa de encontros, formando flocos. Na ruptura ocorre a erosão dos flocos devido às forças de cisalhamento, as quais são normalmente acentuadas com uma agitação intensa ou com um grande tempo de floculação, causando a degradação parcial ou total dos flocos em poucos segundos (THOMAS, 1999; YUKSELEN E GREGORY, 2004).

Segundo Nan e He (2011) inicialmente ocorre a agregação (ou formação), seguida do estágio de ruptura (ou quebra), fase de recrescimento (ou reestruturação), e por fim alcance da estabilidade através do equilíbrio entre a agregação e ruptura.

As características dos flocos - tamanho, estrutura e resistência - se alteram continuamente ao longo das etapas da floculação e geram impacto significativo na eficiência dos processos e na qualidade da água tratada para o abastecimento (NAN et al., 2009; MORUZZI et al., 2010; VANDAMME et al., 2014).

A cinética da floculação está diretamente relacionada à Distribuição do Tamanho de Partículas (*DTP*). Esta, por sua vez, depende do gradiente médio de velocidade (*G*) e do tempo de floculação (*T*) e, de acordo com Chakraborti et al. (2000) e Oliveira et al. (2015), ela pode ser determinada através de parâmetros tais como número, massa, diâmetro, área e volume das partículas.

A técnica fotográfica juntamente com a análise digital das imagens permitem quantificar e identificar a relação entre a estrutura e as características dos flocos, de maneira não intrusiva, além de determinar a *DTP* (FRANCESCHI et al., 1990; JUNKER, 2006).

Segundo Argaman (1971), a eficiência da floculação pode ser estimada através da modelação matemática considerando os fenômenos de agregação e ruptura. Dessa forma, tem-se a possibilidade de se obter as relações do número de flocos e do número de partículas primárias com o tempo de floculação.

Essa dissertação se insere em um grupo de pesquisas voltado aos aspectos conceituais, fenomenológicos e experimentais, acerca do estudo de tratamento de águas para abastecimento, de modo a investigar a influência das partículas de primeira classe de tamanho no desempenho do processo de floculação e na obtenção dos parâmetros cinéticos - constantes de agregação (K_A) e ruptura (K_B) – com utilização da técnica de análise de imagem. Este trabalho está inserido na mesma linha de pesquisa dos trabalhos de Moruzzi e Reali (2007), Gregory (2009),

Moruzzi et al. (2009), Xiao et al. (2011), Nan and He (2012), Z.Yang et al.(2013), Rhaman et al. (2014), Yao et al. (2014), Oliveira et al. (2015), Marques e Ferreira Filho (2016), Moruzzi et al. (2016) e Ren et al. (2016).

A Tabela 1 apresenta alguns trabalhos recentes, relacionados ao escopo do presente trabalho, onde foram empregadas metodologias não intrusivas baseadas na análise de imagem digital de partículas floculentas.

Tabela 1 – Trabalhos realizados no grupo de pesquisa

Autores/ano	Objetivo	Descrição	Resultados
Moruzzi e Reali (2007)	Determinar a distribuição de tamanho de microbolhas em sistemas de flotação para tratamento de águas	As imagens digitais foram adquiridas com uma câmera digital "coolpix" modelo Nikon 5400 de 5.1MPixel, com ajuste de foco manual e programada para disparo múltiplo a 1/500, foi acoplada a conjunto de lentes com 60x de ampliação. O tamanho do pixel foi de aproximadamente 0,005mm. A análise das imagens adquiridas foi realizada com o software Image Tool versão 3.0	Verificou-se que houve um discreto aumento no número de bolhas com diâmetros menores que 50µm (d50) quando não foi aplicado coagulante.O diâmetro médio foi praticamente o mesmo na presença ou ausência de coagulante (de 27 µm, sem Al+3 para 29 µm, com Al+3) pois a variação em número das microbolhas foi pouco sensível devido ao elevado percentual do d50. No entanto, ao se considerarmos o diâmetro estatístico DSauter (D3,2), notou-se uma variação de 40 para 48 µm quando o coagulante (Al+3) foi aplicado para as mesmas condições de mistura e tempo de detenção, indicando que o fenômeno da aglutinação foi ligeiramente mais acentuado na presença do cátion Al+3.
Gregory (2009)	Monitoramento óptico da formação de flocos	O monitoramento da formação de floco e da ruptura foi realizado com uma "flutuação de turbidez" altamente sensível dispositivo (Particle Monitor, Rank Brothers Ltd., Reino Unido). o princípio desta técnica consiste na medição da intensidade da luz transmitida através de uma suspensão fluida. na medição da intensidade da luz transmitida através de uma suspensão fluida	Demonstrou-se que os flocos de hidróxido típicos daqueles gerados em plantas de tratamento de água podem ter uma densidade muito baixa e um índice de refração pouco efetivo. Isso ocorre porque as partículas primárias são muito pequenas e os flocos na faixa de tamanho esperada podem conter milhões de partículas primárias. Para dimensões fractal de cerca de 2 e com nenhum outro componente isso inevitavelmente leva a densidades muito baixas de flocos de hidróxido e fraca dispersão da luz. Os resultados re-dimensionados mostraram que a dinâmica da formação de flocos, ruptura e recrescimento são muito pouco afetadas pela incorporação de partículas de caulinita. O tamanho, a estrutura e a força dos flocos parecem ser principalmente governados pela natureza do próprio floco de hidróxido. O principal motivo para o comportamento diferente mostrado parece ser que os coeficientes de dispersão dependem grandemente da quantidade de argila incluída nos flocos.
Moruzzi et al. (2010)	Caracterização da distribuição do tamanho de micro bolhas e configuração do fluxo na zona de contato	As imagens digitais foram adquiridas com uma câmera digital "coolpix" modelo Nikon 5400 de 5.1MPixel, com ajuste de foco manual e programada para disparo múltiplo a 1/500, foi acoplada a conjunto de lentes com 60x de ampliação. O tamanho do pixel foi de aproximadamente 0,005mm. A análise das imagens adquiridas foi realizada com o software Image Tool versão 3.0	Os resultados mostram que os intervalos de diâmetro obtidos estavam de acordo com os valores relatados na literatura (10-100 µm), independentemente das condições investigadas. O diâmetro médio linear variou de 20 a 30 µm, ou de forma equivalente, o diâmetro Sauter (d3,2) variou de 40 a 50 µm. Em todas as condições investigadas, D50 estava entre 75% e 95%. a distribuição de tamanho de microbolhas pode apresentar um perfil diferente (com uma tendência da curva bimodal), no entanto, ao analisar a distribuição de frequência volumétrica (em alguns casos com a aparência de picos em diâmetros variando de 90-100 µm).

(continua)

Autores/ano	Objetivo	Descrição	Resultados
Xiao et al. (2011)	Caracterização da dinâmica da floculação e estrutura do floco no tratamento de água	Avançado sistema não intrusivo de captação de imagem PIV (particle image velocimetry) para visualização de fluxo com técnica de rastreamento de partícula. Consiste em: Iluminação a laser, Video Câmera high-speed e Software de processamento de dados.	Os resultados mostraram que os flocos de alumínio eram um pouco mais fortes que do que os de cloreto férrico. Os flocos formados inicialmente após a adição dos coagulantes foram maiores e apresentaram maior diâmetro fractal. Após o processo de ruptura, os flocos apresentaram menor tamanho e diâmetro fractal. No processo de recrescimento a estrutura dos flocos foram parcialmente recuperadas, sendo mais estáveis e compactos quando comparados à fase inicial.
Nan and He (2012)	Análise da característica morfológica das partículas em suspensão na água durante o processo dinâmico de floculação	O sistema consistiu em uma lâmpada estroboscópica automatizada, uma câmera de vídeo com dispositivo de carga digital (CCD) de alta velocidade (SVS-VISTEK GmbH, Alemanha) e um pacote de software de controle e processamento de processos (FMans 10, China). O sistema de monitoramento teve uma resolução de cerca de 5,7 mm para imagens de partículas no presente estudo de floculação	Verificou-se que a estrutura de flocos pareceu evoluir para um estado estacionário de acordo com a taxa de cisalhamento, e estruturas mais compactas foram obtidas após a quebra de flocos em fluxo de cisalhamento reduzido devido ao processo de quebra de flocos e recrescimento. O tempo de floculação necessário para alcançar o estado estacionário para diâmetro médio (dp) e diâmetro fractal (Dpf) diminuiu com o aumento de G, mas o estado estacionário foi alcançado mais rápido para Dpf do que para dp com as mesmas taxas de cisalhamento, possivelmente devido à auto-semelhança de agregados fractais.
Z.Yang et al. (2013)	Metodologia para cálculo da cinética de floculação combinando o modelo Smoluchowski com a teoria fractal	Sistema óptico não intrusivo de dispersão de luz com comprimento de onda da radiação de 633 nm, aliado a análise de imagem através do software Malvern Mastersizer Sistema 2000.	Foi observado que o diâmetro fractal se torna maior com o aumento do tempo de floculação, indicando que os flocos se tornam mais densos durante o processo.
Rhaman et al. (2014)	Efeito da concentração de partículas e turbidez na caracterização das partículas utilizando holografia digital	Foi utilizado uma fonte laser (Lambda Photometrics DPGL3020 (30mW) Harpenden, Reino Unido) de 532 nm de comprimento de onda e um CCD (The image source DMK41BF02, Bremen, Alemanha) com resolução de 1280x960.	Os resultados demonstraram que o desempenho de medição da distribuição do tamanho de partículas pode ser significativamente melhorado através da redução da profundidade da amostra. Com eficiência de detecção de 50% como limiar, pode-se concluir que a configuração do sistema de holografia digital funciona bem até concentrações de partículas de 0,1%(v/v) e 0,2%(v/v) para profundidades de amostra de 10mm e 5mm, respectivamente, e 150uT para 10 mm de profundidade.
Yao et al. (2014)	Efeito da distribuição do tamanho de partículas na turbidez sob vários níveis de qualidade da água durante o processo de floculação	O sistema consistiu em uma lâmpada estroboscópica automatizada, uma câmera de vídeo com dispositivo de carga digital (CCD) de alta velocidade (SVS-VISTEK GmbH, Alemanha) e um pacote de software de controle e processamento de processos (FMans 10, China). O sistema de monitoramento teve uma resolução de cerca de 5,7 mm para imagens de partículas no presente estudo de floculação	A evolução temporal da distribuição do tamanho de partículas em diferentes qualidades de água foi monitorada por contagem de partículas on-line e turbidimetria, que descreveu o processo contínuo de crescimento de partículas. Na turbidez mais baixa predominaram partículas menores e foi difícil produzir flocos com altos valores de fractal devido a menor taxa de colisão. Na faixa de 0-40uT o número total de partículas aumentou linearmente com a turbidez, enquanto houve uma fraca relação entre esses índices para intervalo de turbidez de 40 a 100 uT.
Oliveira et al. (2015)	Avaliação de parâmetros representativos da distribuição de partículas presentes em coleções hídricas	Equipamento de bancada Jartest para simular o processo de coagulação/floculação, câmera Vision Research Miro EX4 para aquisição de imagens e software Image-Pro Plus para tratamento das imagens e obtenção das características das partículas.	A representação da Distribuição do Tamanho de Partículas por meio de seu parâmetro β se mostrou de fácil reprodutibilidade. Constatou-se que para o gradiente de floculação (Gf) igual a 20 s ⁻¹ há um deslocamento da curva para a direita traduzindo o predomínio das partículas de maior diâmetro e uma certa estabilidade em torno das partículas de menor diâmetro para os demais gradientes avaliados.

(continua)

Autores/ano	Objetivo	Descrição	Resultados
Marques e Ferreira Filho (2016)	Cinética de floculação de água de baixa turbidez e processo irreversível de ruptura de flocos	O método dos mínimos quadrados foi utilizado para calibrar as constantes cinéticas. A soma residual dos valores dos quadrados (SR) foi minimizada com auxílio da função Solver do Microsoft Excel utilizando regressão não linear GRG	Os resultados experimentais obtidos sugerem que o equilíbrio proposto pelo modelo de Argaman e Kaufman não é constante ao longo do tempo, uma vez que foi detectado aumento de turbidez residual em alguns ensaios. Tal fenômeno foi atribuído ao processo de quebra irreversível dos flocos. Para doses elevadas de coagulantes e/ou elevados valores de G, a inclusão do processo de quebra irreversível ao modelo de Argaman e Kaufman apresentou melhor ajuste aos resultados experimentais.
Moruzzi et al. (2016)	Floculação: considerações a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição do tamanho de partículas	Equipamento de bancada Jartest conjugado à câmera Vision Research Miro EX4 com iluminação constituída de uma plano laser de 2000 mW de potência com comprimento de onda de 532 nm e com 2mm de espessura, ajustado ao foco do sistema de captura de imagens. O tratamento das imagens foi realizado com auxílio do software Image-Pro Plus.	Verificou-se que o emprego isolado do produto GT não é adequado para representar as variações de desempenho e que o modelo clássico de agregação e ruptura pode ser influenciado pela medida indireta de turbidez, bem como pelo uso da sedimentação como etapa intermediária. Por outro lado, a avaliação direta de desempenho por meio da DTP, representada pela função contínua linearizada, pode constituir ferramenta promissora na avaliação dedicada da floculação.
Ren et al. (2016)	Análise da morfologia do floco em um reator de floculação e sedimentação de fluxo contínuo	O sistema consistiu em uma lâmpada estroboscópica automatizada, uma câmera de vídeo com dispositivo de carga digital (CCD) de alta velocidade (SVS-VISTEK GmbH, Alemanha) e um pacote de software de controle e processamento de processos (FMans 10, China). O sistema de monitoramento teve uma resolução de cerca de 5,7 mm para imagens de partículas no presente estudo de floculação	Os resultados mostraram que o tamanho do floco é dependente da dose de coagulante. O valor da dimensão fractal aumentou, ilustrando que um floco de forma linear tendia a ser produzido a uma dose de coagulante relativamente baixa, enquanto uma forma esférica tendia a ser gerado por doses de coagulante relativamente altas. Os resultados distribuição do tamanho de partículas estavam de acordo com os resultados obtidos da tamanho médio dos flocos. Medições de morfologia de flocos apresentaram um crescimento sustentado de agregados durante todo o processo de floculação.

Fonte: Autor (2017)

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Obtenção das constantes cinéticas a partir da análise clássica da floculação para águas de baixa turbidez ($6,5 \text{ uT} \pm 2$), utilizando o Sulfato de Alumínio (*SA*), Cloreto Férrico (*CF*) e o Policloreto de Alumínio (*PAC*) como coagulantes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) Determinar para cada tipo de coagulante de estudo as condições ótimas de coagulação e escolha do ponto de trabalho (*pH* e dosagem de coagulante);
- b) Seguir procedimentos para aquisição e análise das imagens do processo de floculação, com seus respectivos erros associados;
- c) Obtenção das curvas de Distribuição de Tamanho de Partículas para cada um dos coagulantes;
- d) Considerar as partículas concentradas na primeira classe da curva da *DTP* como sendo representativas de partículas primárias, para obtenção das constantes cinéticas de agregação e ruptura.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 COAGULANTES QUÍMICOS

De acordo com Santos et al. (2007), para se definir o tipo de coagulante a ser utilizado diversos fatores devem ser considerados, dentre eles a sua adequabilidade à água bruta; a tecnologia de tratamento empregada; o custo do coagulante propriamente dito; o custo dos produtos químicos porventura associados – alcalinizantes, ácidos ou auxiliares de coagulação; e o custo e manutenção dos tanques e dosadores.

Os sais de alumínio e ferro, especificamente o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{ a } 16 \text{ H}_2\text{O}$), o policloreto de alumínio (*PAC*) ($\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{3n-m}$, na qual a relação $m/3n \times 100$ representa a basicidade do produto) e o cloreto férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), estão dentre os principais coagulantes utilizados em sistemas de tratamento de água (PAVANELLI, 2001).

Segundo Crittenden et al. (2012), para o sulfato de alumínio, a menor concentração solúvel de Al^{3+} é obtida quando o *pH* é em torno de 6,0. De acordo com Pavanelli (2001) a menor concentração de solúvel de Fe^{3+} , quando utilizado o cloreto férrico, é obtida quando o *pH* é mantido próximo de 6,0. O mesmo autor ainda afirma que para o policloreto de alumínio, a

menor concentração de Al^{3+} é em torno de pH igual a 9,0, mas o PAC, pode apresentar uma região ampla de coagulação, a partir de pH igual a 5 até valores mais elevados, próximos de 10.

O PAC, na maioria dos casos, revela-se como coagulante superior ao sulfato de alumínio. Para a eliminação de substâncias coloidais, sua eficácia, em média, é 2,5 vezes superior em igualdade de dosagem ao íon Al^{3+} a dos outros sais de alumínio habitualmente utilizados (PAVANELLI, 2001; SRIVASTAVA et al. 2005).

3.2 COAGULAÇÃO e FLOCULAÇÃO

Segundo Di Bernardo et al. (2003), a coagulação resulta do emprego de coagulantes como sais de ferro ou de alumínio e, em alguns casos, de polímeros, na remoção de impurezas da água bruta. Tal processo pode ocorrer de maneira isolada ou por meio da combinação de quatro mecanismos: adsorção e neutralização de cargas, compressão da camada difusa, formação de pontes e varredura.

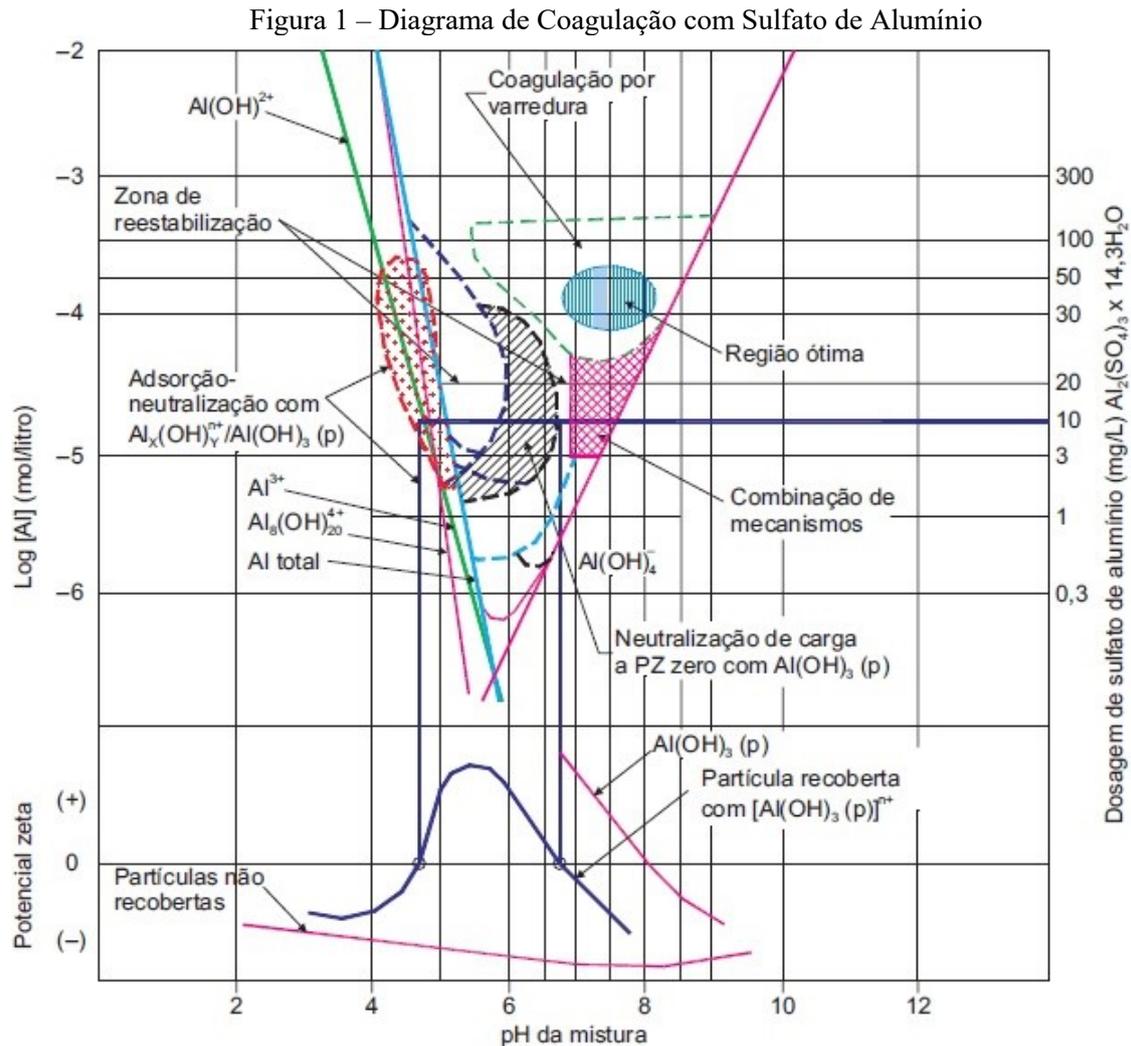
Dentre os mecanismos citados, o de varredura é o mais empregado por estar presente nas tecnologias convencionais ou de ciclo completo e por permitir a formação de floco com densidade propícia para sedimentação. Tem como principal característica altas dosagens de coagulantes, que aliada ao pH da mistura e à presença de íons na água, acarreta na formação de precipitado (SANTOS et al., 2007).

Segundo Arboleda (1992) os flocos, resultado de sucessivas colisões entre as partículas, dependem de suas velocidades de formação vinculadas ao tamanho das partículas em relação à agitação do meio, ao grau de desestabilização e à concentração das partículas. Dessa forma, os choques otimizam a aderência e contribuem para a formação dos agregados influenciando diretamente nas suas características de sedimentabilidade.

Han et al. (2006) afirmam que flocos com distintas características e tamanhos podem apresentar a mesma velocidade de sedimentação, uma vez que a sedimentação depende também da

densidade do floco e da força de ligação entre as partículas que o constitui, além disso, flocos com tamanho e forma semelhantes podem apresentar diferentes tempos de sedimentação.

A qualidade da água bruta influi diretamente nas dosagens de *pH* e coagulante a serem utilizadas na formação de flocos, assim como na empregabilidade e escolha do mecanismo de coagulação a ser utilizado. De acordo com Armitarajah et Mills (1982), o diagrama de solubilidade do alumínio para água com alto valor de turbidez (100 *uT*) é conforme Figura 1.

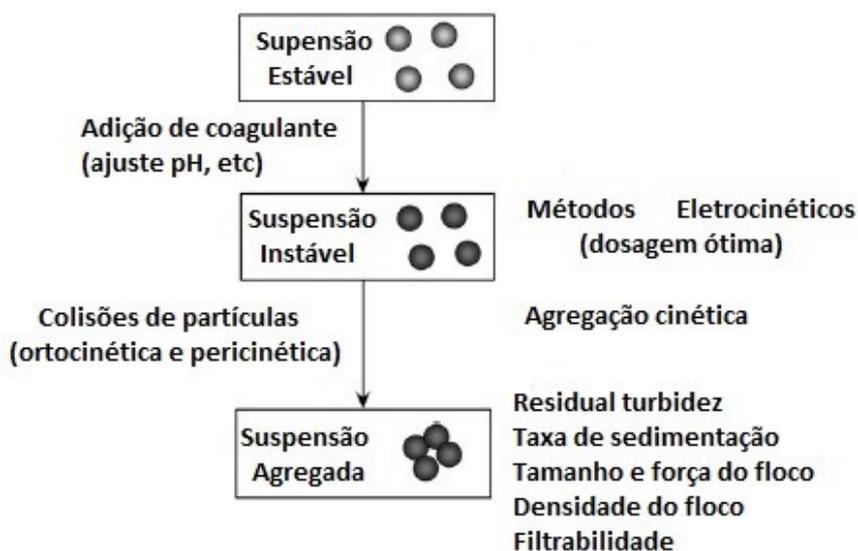


Fonte: Di Bernardo et al.(2003).

Nota-se que, para o mecanismo de coagulação de varredura, a região ótima é alcançada com dosagens de *pH* entre 6 e 8, sendo a dosagem do coagulante superiores a 30 mg/L. É recomendável encontrar o par de valores de dosagens de *pH* e coagulante para cada situação, visto que a natureza da água varia para cada estudo e/ou investigação a ser realizada.

Thomas et al. (1999), Santos et al. (2004) e Gregory (2009), afirmam que o processo de floculação envolve, basicamente, dois mecanismos: adesão, que corresponde a desestabilização de partículas pela adição de coagulantes/floculantes ou, possivelmente, ajustando as condições químicas, como correção do *pH* por exemplo; e transporte, que refere-se à agitação introduzida ao meio provocando colisões das partículas desestabilizadas para formação de agregados. Estes podem ocorrer através da difusão browniana (floculação pericínética), pelo movimento induzido do fluido (floculação ortocínética) ou pela sedimentação diferencial, onde há encontro das partículas com diferentes velocidades de sedimentação. O processo de tratamento de água para abastecimento geralmente apresenta partículas maiores, onde a interação pericínética é dificultada, o que a torna insignificante quando comparada às interação ortocínética e a sedimentação diferencial. A Figura 2 ilustra um esquema simplificado da formação de flocos.

Figura 2 - Agregação de partículas e métodos



Fonte: Adaptado Gregory (2009).

De acordo com Thomas et al. (1999), a tentativa de descrever a variação do tamanho das partículas, em meio aquoso, iniciou-se com Smoluchowski (1917) através de um modelo baseado nas hipóteses a seguir:

- ✓ A eficiência das colisões é de 100%;
- ✓ Escoamento experimentado pelo meio líquido é laminar;
- ✓ As partículas estão monodispersas;
- ✓ Não ocorre ruptura dos flocos formados;
- ✓ Todas as partículas são esféricas e permanecem assim após as colisões, e
- ✓ As colisões ocorrem somente entre duas partículas.

Seguindo as premissas de Smoluchowski (1917), Camp & Stein (1943) empregaram o número de Camp (GT), adimensional que representa a probabilidade do número de colisões entre partículas floculentas. Entretanto, de acordo com Thomas et al. (1999), apenas o número de Camp não era suficiente para descrever o processo de floculação, visto que não considerava o efeito da quebra dos flocos.

Dessa forma, Argaman e Kaufman (1970) consideraram o efeito da erosão dos flocos, devido as tensões cisalhantes resultantes das colisões entre partículas, representados pelas constantes de agregação e ruptura. De acordo com os autores, a ruptura dos flocos pode ocorrer através de dois fatores: erosão superficial de partículas primárias presentes nos flocos e fragmentação dos mesmos em flocos menores e de tamanho similar.

Bratby et al. (1977), através de ensaios com reatores estáticos, apresentaram a equação 1 para determinação das constantes de agregação e ruptura.

$$\frac{N_0}{N} = \left[\frac{K_B}{K_A} G + \left(1 - \frac{K_B}{K_A} G \right) e^{-K_A G T} \right]^{-1} \quad (1)$$

Em que:

N_0 – número inicial de partículas primárias antes da floculação após longo período de sedimentação (medido em termos de turbidez inicial da água – uT);

N - número de partículas primárias após o tempo T de floculação e após longo período tempo de sedimentação (medido em termos de turbidez inicial da água – uT);

K_A - Constante cinética de agregação;

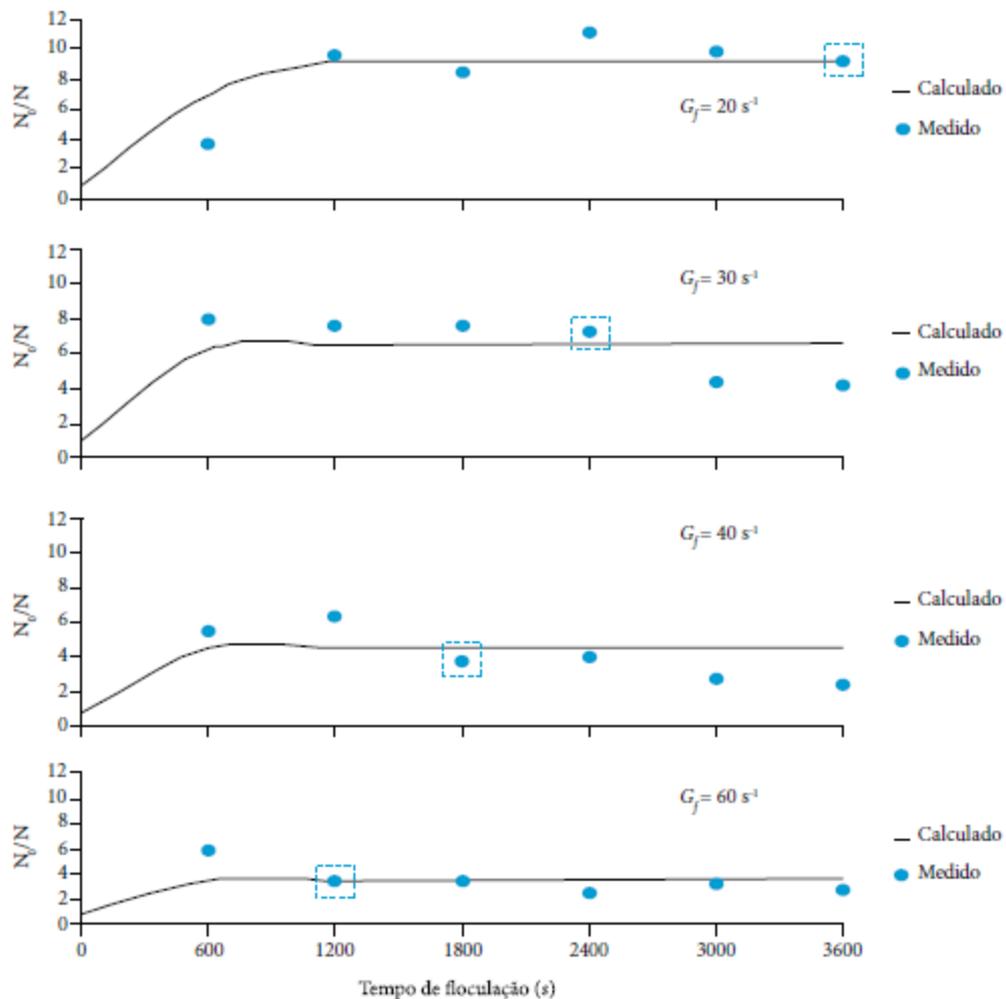
K_B - Constante cinética de ruptura (s);

G – Gradiente de velocidade médio (s^{-1});

T – Tempo de floculação (s).

Moruzzi et al. (2016), baseado no modelo de Bratby et al. (1977), retrataram o desempenho da floculação para um faixa de valores de tempo de floculação (T) e gradiente médio de floculação (G) quando utilizado o sulfato de alumínio como coagulante, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Aplicação da Equação 1 para os dados obtidos à velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min, $K_A = 2,74 \cdot 10^{-4} \pm 2,02 \cdot 10^{-6}$ e $K_B = 1,41 \cdot 10^{-6} \pm 8,76 \cdot 10^{-8}$ para intervalo de confiança de 95%. Os pontos em destaque correspondem aos valores de GT de 7200.



Fonte: Moruzzi et al. (2016)

Observa-se que logo nos primeiros minutos de floculação houve uma tendência de equilíbrio dinâmico que é totalmente dependente do valor do gradiente de velocidade médio. Quanto menor o valor deste maior é a eficiência da remoção de turbidez, como já esperado, pois quanto maior for o valor de G maior é a quebra dos flocos, o que, conseqüentemente, promove a alteração das características dos agregados, resultando, assim, em um menor grau de eficiência

da remoção de turbidez. Os resultados ilustrados na Figura 3 corroboram o experimento realizado por Bratby et al. (1977).

Para Di Bernardo et al. (2005) os valores de K_A e K_B são específicos para as características de cada sistema e, por esse motivo, deve-se evitar comparações mesmo que entre sistemas semelhantes.

Crittenden et al. (2012) apresentam valores para constantes cinéticas de agregação e ruptura, conforme ilustra a Tabela 2.

Tabela 2 - Constantes de agregação (K_A) e ruptura (K_B)

Material	K_A	K_B	Autor
Caulinita	$4,5 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-7}$	ARGAMAN e KAUFMAN (1970)
+ Sulfato de Alumínio	$2,5 \times 10^{-4}$	$4,5 \times 10^{-7}$	BRATBY et al (1977)
Partículas naturais			
+ Sulfato de Alumínio	$1,8 \times 10^{-5}$	$0,8 \times 10^{-5}$	ARGAMAN (1971)

Fonte: Adaptado Crittenden et al (2012)

Além dos supracitados, vários autores, dentre eles, Bratby (1981), Pádua (1994), Libânio (1995), Brito (1998), Di Bernardo et al. (2005) e Moruzzi e Oliveira (2013) desenvolveram pesquisas relacionadas à obtenção de parâmetros cinéticos da floculação..

Bratby (1981) propôs um modelo, em face à cinética de floculação, com a premissa de longo tempo de sedimentação – maior que duas horas. Entretanto, tal tempo, segundo Pádua (1994), subestima os valores dos gradientes de velocidade de floculação, visto que não retrata com o que, de fato, ocorre nas ETAs, já que estas, apresentam menores tempos de agitação em suas unidades.

Libânio (1995), através de experimentos em laboratório, também questionou o modelo proposto por Bratby (1981) ao afirmar que com o aumento do tempo de agitação se reduz a eficiência do processo de floculação. Segundo o autor, uma vez atingido o tamanho máximo dos flocos o mecanismo de ruptura prevalece e, submetê-los a longos períodos de sedimentação implicaria na desagregação dos mesmos, ou seja, resultaria em flocos cada vez menores reduzindo, assim, a eficiência do processo.

Entretanto, Oliveira et al (2015), observaram que há estabilidade entre formação e ruptura dos flocos à partir de 60 minutos de tempo floculação. Ressaltam que, no modelo proposto por Bratby (1981), o longo tempo de sedimentação para obtenção das constantes cinéticas da floculação está relacionado à necessidade de desaparecimento de partículas primárias da suspensão e não necessariamente à sedimentabilidade dos flocos resultantes, ou seja, do ponto de vista do modelo cinético, a floculação é eficiente a partir da formação de flocos, sedimentáveis ou não nas velocidades praticadas em Estações de Tratamento de Água, conforme sugerido por Pádua (1994).

Investigando acerca das constantes de agregação e ruptura, Brito (1998) constatou que para baixas velocidades de sedimentação os valores de K_A aumentaram e os de K_B diminuíram. Logo, chegou-se à conclusão que a escolha dos parâmetros G e T sofrem influência considerável da velocidade de sedimentação dos flocos durante o processo de floculação.

Considerando o efeito da velocidade de sedimentação, dados de turbidez e da quantidade de partículas primárias remanescentes, Di Bernardo et al. (2005) determinaram as constantes K_A e K_B a partir da modificação do método de Bratby (1981) – Método da Equação de Agregação e Ruptura (*MEAR*) que considera a eficiência máxima para cada valor de G , obtendo o menor tempo de floculação em que a relação máxima de N_0/N é obtida.

Os autores consideraram uma condição específica de agregação e ruptura para cada gradiente de velocidade médio e para cada velocidade de sedimentação. Utilizaram a ferramenta *solver* do programa *Microsoft Excel*[®] para convergência dos valores de N_0/N através da equação 1

supracitada. A calibração do modelo de convergência se deu a partir de valores iniciais de K_A entre 10^{-8} e 10^{-20} em que foi possível a determinação, por meio da ferramenta *solver*, dos valores de K_A e K_B , conforme ilustrado na Tabela 3.

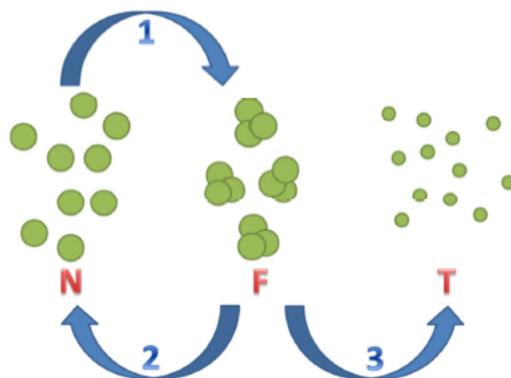
Tabela 3 - Valores de K_A e K_B para valores de velocidade de sedimentação de $2,5 \text{ cm.min}^{-1}$.

G (s⁻¹)	K_A	K_B
20	$1,83 \times 10^{-4}$	$1,83 \times 10^{-7}$
30	$9,40 \times 10^{-5}$	$1,91 \times 10^{-7}$
40	$6,97 \times 10^{-5}$	$2,33 \times 10^{-7}$
50	$7,93 \times 10^{-5}$	$2,42 \times 10^{-7}$
60	$3,68 \times 10^{-5}$	$2,30 \times 10^{-7}$

Fonte: Adaptado Di Bernardo et al (2005)

De acordo com Jarvis et al. (2005), a ruptura permanente dos flocos pode influenciar diretamente a eficiência do processo de floculação. Em termos de modelagem matemática, Marques e Ferreira Filho (2016) propuseram uma modificação ao modelo clássico da cinética de floculação de Argaman e Kaufman (1970), onde uma segunda constante referente à ruptura dos flocos é incluída no processo. Segundo os autores, uma parcela de flocos formada durante o processo de agregação sofre ruptura permanente, resultando no surgimento de partículas não passíveis de remoção por sedimentação, e que não irão formar flocos novamente, como mostra a Figura 4.

Figura 4- Modificação do modelo clássico da cinética de floculação de Argaman e Kaufman (1970) proposta por Marques e Ferreira Filho (2016)



Fonte: Marques e Ferreira Filho (2016)

A Figura 4 apresenta três diferentes termos utilizados pelos autores, onde N refere-se às partículas primárias remanescentes, F representa as partículas formadas durante o processo de agregação e passíveis de remoção através da sedimentação e T representa as partículas residuais permanentes não passíveis de agregação e/ou remoção através da sedimentação. Em síntese, as setas indicadas por 1 e 2 são referentes ao modelo clássico de cinética de floculação proposto por Argaman e Kaufman (1970), enquanto a seta indicada por 3, refere-se à modificação proposta pelos autores. Matematicamente, a ruptura permanente é apresentada através de uma nova constante cinética, K_C , como mostra a equação.

$$\frac{dF}{dt} = K_A GN - K_B N_0 G^2 - K_C GF \quad (2)$$

Em que:

$\frac{dF}{dt}$ – variação da concentração de partículas formadas devido à somatória dos processos de agregação e ruptura;

N – turbidez resultante da presença de partículas primárias (uT);

N_0 – turbidez inicial resultante da presença de partículas primárias (uT);

G – gradiente médio de velocidade (s^{-1});

F – turbidez resultante das partículas formadas devido ao processo de agregação (uT);

K_A – constante cinética de agregação (adimensional);

K_B – constante cinética de ruptura (s);

K_C – constante cinética de ruptura permanente (s).

Segundo Marques e Ferreira Filho (2016), o ajuste do modelo proposto foi obtido através de iterações numéricas computacionais através da ferramenta *solver* do programa *Microsoft Excel*[®]. Os valores das constantes K_A , K_B e K_C tiveram uma boa aderência aos resultados experimentais, o que permitiu a constatação dos autores, de que o novo termo incluso representa o fenômeno de quebra irreversível sugerido. Os autores ainda constataram que tal fenômeno é dependente do valor de G . Valores mais elevados de G resultaram na intensificação da ruptura permanente, e à medida em que se aumentou o tempo de floculação foi observado uma tendência de aumento da turbidez residual, ou seja, o aumento do gradiente de velocidade médio acarreta na diminuição da eficiência do processo de floculação. Cabe ressaltar, que os autores desenvolveram experimentos para água de baixa turbidez, com sulfato de alumínio e cloreto férrico como coagulantes, sendo que este foi mais eficiente que aquele na remoção de turbidez.

No decorrer dos anos notou-se um grande avanço dos recursos computacionais disponíveis através de ferramentas que auxiliam os trabalhos de modelagem matemática. Di Bernardo et al. (2005) utilizaram de ferramentas, como linguagem de programação *Fortran* e métodos de resoluções de equações não-lineares: *Newton-Raphson's* e *Wegstein*, para análise do processo de floculação em sua pesquisa. O programa *Microsoft Excel*[®] é outro recurso que fornece ferramentas como o *Solver*, para regressão não linear, utilizada por Oliveira et al. (2015), Moruzzi et al. (2016), dentre outros.

3.3 CARACTERÍSTICAS DOS FLOCOS

3.3.1 Formação, quebra e reformação dos flocos

Bache e Gregory (2010) afirmam que o tamanho do floco pode ser apontado como o fator que exerce maior influência sobre a densidade e a força de formação de flocos.

De acordo com Bache et al. (1997) e Jarvis et al. (2005) a força do floco está diretamente relacionada à estrutura do floco e, portanto, dependente do processo de formação dos mesmos. Os flocos não crescem infinitamente. O crescimento atinge um estado estacionário para uma dada condição de cisalhamento. Geralmente o crescimento dos flocos está relacionado com a quebra, de modo que a taxa de agregação é o equilíbrio entre a formação e ruptura dos agregados.

Segundo Jarvis et al. (2005), a capacidade de recrescimento dos flocos pode acarretar em uma melhor eficiência no processo subsequente, que é a remoção dos flocos. Os flocos desagregados, por apresentarem maior contato entre si, facilitam a etapa de recrescimento.

Yukselen e Gregory (2004) compararam a ruptura relativa e o recrescimento de diferentes sistemas floculados através da utilização de fatores de força (*FF*) e recuperação dos flocos (*FR*), que podem ser calculados como descrito nas Equações 3 e 4, respectivamente.

$$\text{Fator Força} = \frac{d_1}{d_2} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Fator Recuperação} = \frac{d_3 - d_2}{d_1 - d_2} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

d_1 - tamanho médio dos flocos antes da quebra;

d_2 - tamanho dos flocos após o período de quebra e

d_3 - tamanho dos flocos após o recrescimento.

Um *FF* elevado indica flocos que possuem maior capacidade de resistir ao cisalhamento e, portanto, devem ser considerados mais fortes do que os de uma suspensão de *FF* inferior. De

maneira análoga, o aumento do *FR* retrata flocos com melhor capacidade de recrescimento após sofrer cisalhamento.

Yukselen et Gregory (2004) realizaram um experimento para análise da formação, ruptura e recrescimento dos flocos, tendo como coagulante o Sulfato de Alumínio. Inicialmente, os autores promoveram uma agitação de 400 rpm durante 10 s, seguido de agitação lenta de 50 rpm durante 10 min. A quebra dos agregados foram decorrentes do aumento da velocidade de agitação para 400 rpm, durante vários intervalos de tempos (10, 30, 60 e 300 s), após o período de agitação lenta.

Segundo os mesmos autores, as curvas de formação e quebra dos flocos revelam uma região constante do índice de floculação, isto é, do tamanho dos flocos, a qual é atingida rapidamente. Isso demonstra que há um equilíbrio entre o crescimento e ruptura dos agregados a uma certa velocidade de agitação, fato este, comprovado por Li et al. (2006), que afirmam que, para uma dada condição de cisalhamento, o aumento do tamanho dos flocos é resultado do aumento da força dos flocos, ou seja, o tamanho dos flocos é o equilíbrio entre o crescimento e a ruptura dos mesmos.

Yukselen e Gregory (2004) observaram que com apenas 10 s de agitação a 400 rpm o índice de floculação apresentou decréscimo menor devido ausência de tempo para completar a quebra inicial. Houve um maior grau de recuperação a 50 rpm e o aumento no índice de floculação foi mais rápido do que para os períodos de ruptura mais longos. Os autores ainda concluíram que, com 300 s a 400 rpm, houve uma diminuição muito mais gradual do índice de floculação, evidenciando uma recuperação mais limitada a um grau de agitação de 50 rpm.

A estabilidade dos flocos em suspensão é, portanto, dependente do quão fácil eles são de quebrar, sendo diretamente relacionada com a força e o número de relações que os mantém juntos. Durante a rápida formação inicial os micro flocos agregados dominam a quebra dos flocos. No entanto, a importância da ruptura aumenta à medida que há aumento do tamanho dos flocos até que a distribuição do tamanho de partículas atinja um estado estacionário de crescimento. Assim o tamanho dos flocos, no estado estacionário, é regido pelas condições

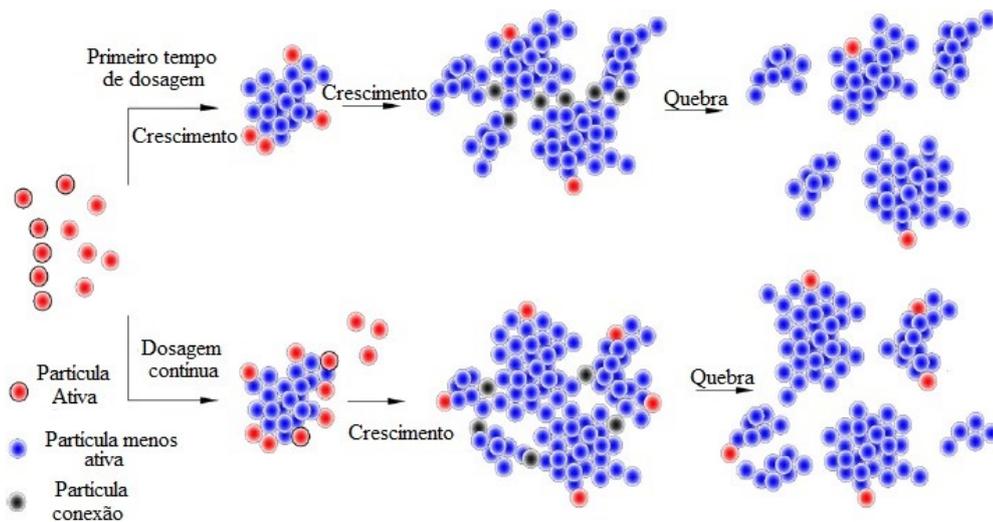
prevalecentes de cisalhamento/choques dentro do recipiente que os contêm. A taxa de colisão e a natureza das interações das partículas são fundamentais para a taxa de crescimentos dos flocos e pode ser resumida como a diferença entre a taxa de agregação e a taxa de quebra dos flocos (JARVIS et al., 2005).

Para W.Yu et al. (2012) o tamanho dos flocos e a conexão entre eles são fundamentais no processo de formação e quebra. Os flocos maiores sofrem ruptura nos pontos correspondentes às ligações onde a magnitude relativa das forças de coesão e de cisalhamento aplicadas são elevadas.

Os autores analisaram a formação, quebra e recrescimento dos flocos através da dosagem por tempo e da dosagem contínua utilizando-se o sulfato de alumínio como coagulante. Segundo os autores, após a quebra dos flocos houveram poucos pontos ativos na superfície dos flocos quebrados e uma baixa capacidade de recrescimento dos mesmos, caso nenhuma dosagem adicional de coagulante fosse adicionada. Eles verificaram que uma dosagem adicional de sulfato de alumínio, após a ruptura dos flocos, melhora a capacidade de recrescimento devido o ponto inativo ser reparado tornando-se ativo. Assim, o número de partículas ativas determina a capacidade de recrescimento dos flocos, sendo esta menor em dosagem única do que em dosagem contínua.

A Figura 5 apresenta um diagrama esquemático para explicar a variação da atividade dos flocos durante o processo de formação e ruptura.

Figura 5 – Diagrama esquemático da variação da atividade dos flocos na formação e processo de quebra



Fonte: Adaptado W.YU et al. (2012)

Outro fator importante a ser considerado na formação dos flocos é a influência do pH sobre os mesmos. Xu et al. (2011) investigaram tal influência para uma água sintética contendo concentração de $4,77 \pm 0,03 \text{ mg.L}^{-1}$ de ácido húmico e pH de $7,9 \pm 0,02$ e coagulantes como o sulfato de alumínio e o policloreto de alumínio. Para ambos coagulantes, em condições ácidas, os flocos apresentaram tamanhos pequenos e uma estrutura forte. À medida do aumento de pH surgiram flocos maiores e com estruturas mais fracas.

3.3.2 Distribuição do tamanho de partículas (*DTP*)

Segundo Santos et al. (2004) a falta de conhecimento acerca dos fenômenos ocorridos no interior das unidades das ETAs aliada aos parâmetros indiretos adotados para determinação da qualidade da água, limitam o melhoramento dos processos de controle, operação e monitoramento das estações.

De acordo com Chakraborti et al. (2000), a agregação de partículas ou formação de flocos é um importante processo, que influencia diretamente na escolha do tratamento de água a ser

implantado e que as alterações de massa, da área superficial, do número, do volume e da distribuição das partículas afetam substancialmente a remoção das impurezas contidas na água.

Segundo Junker (2006) o tamanho das partículas é resultado das medições diretas de diâmetro, área, volume ou através da determinação de um diâmetro equivalente, assumindo forma esférica. Esta, segundo Santos et al. (2004), é a única forma da partícula ser representada por um único número em todas as direções do espaço tridimensional.

O tamanho representativo de uma partícula e o tamanho da esfera equivalente podem ser relacionados de diversas maneiras conforme Equações 5, 6, 7 e 8.

$$d_a = \frac{(\sum d_i)}{n} \quad (5)$$

Em que:

d_a – diâmetro aritmético;

d_i – diâmetro da partícula i ;

n – número total de partículas medidas.

A Equação 6 retrata o diâmetro médio de Sauter que relaciona a área e o volume das partículas.

$$d_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (6)$$

Em que:

d_{32} – diâmetro de Sauter;

n_i - número de partículas de diâmetro representativo d_i ;

$n_i d_i^3$ - volume das partículas;

$n_i d_i^2$ - área das partículas.

A Equação 7 evidencia o diâmetro médio log-geométrico que é importante para quantificar os efeitos da transferência de massa.

$$d_g = \frac{\sum n_i \log d_i}{\sum n_i} \quad (7)$$

Em que:

d_g - diâmetro médio log-geométrico;

n_i - número de partículas de diâmetro representativo d_i ;

d_i - diâmetro da partícula i ;

Já a Equação (8) mostra uma outra alternativa para determinação do tamanho representativo das partículas, desta vez, através do diâmetro volumétrico.

$$d_{30} = \frac{\left(\sum \frac{6V_b}{\pi}\right)^{1/3}}{n} \quad (8)$$

Em que:

d_{30} - diâmetro volumétrico;

V_b - volume total de partículas;

n - número total de partículas medidas.

De acordo com M.Yao et al. (2014), a medição e controle da DTP é muito importante nos processos de separação sólido/líquido, visto que os coloides (0,01 a 0,1mm) e os pequenos sólidos (10 a 100 μ m) são as principais partículas removidas.

Todavia, de acordo com Santos et al. (2004), a escolha da técnica a ser utilizada para determinação da *DTP* depende de inúmeros fatores, desde a natureza da amostra, a utilização do diâmetro obtido, a precisão e a relevância do método escolhido até as questões mais práticas como aquisição, operação e manutenção do equipamento, mão de obra técnica, tratamento e interpretação dos dados obtidos e a necessidade ou não de fracionamento da amostra. Portanto, segundo os mesmos autores, a escolha da técnica de determinação da *DTP* está diretamente ligada a qual propriedade dos agregados se deseja analisar.

Oliveira et al. (2015) utilizaram a técnica de fracionamento, que consiste na separação sucessiva das partículas por faixas de tamanho, de acordo com o parâmetro adotado, desse modo tem-se a possibilidade de analisar cada uma das frações e de se obter a quantidade total de partículas por faixa de tamanho.

Crittenden et al. (2012) afirmaram que a relação da frequência do número de partículas tem por base a relação da concentração das partículas por fração incremental no tamanho das mesmas, como pode-se observar pela Equação 9.

$$(Fd_p) = \frac{dN}{d(dp)} \quad (9)$$

Em que:

Fd_p - Função para definir a frequência de distribuição das partículas;

dN – Concentração do número de partículas em termos da variação incremental dos diâmetros das partículas e

$d(dp)$ - Variação incremental dos diâmetros das partículas.

Ainda de acordo com os mesmos autores, a frequência da distribuição das partículas aumenta com a diminuição do diâmetro das mesmas. A seguir tem-se a Equação 10, que retrata a distribuição das partículas em forma de potência.

$$\frac{dN}{d(d_p)} = A (d_p)^{-\beta} \approx \frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \quad (10)$$

Em que:

A – coeficiente de densidade da equação de potência;

(d_p) - diâmetro da partícula;

β – coeficiente de inclinação da equação de potência;

ΔN – variação do número de partículas na faixa de tamanhos pré-estabelecida e

$\Delta(d_p)$ - variação do diâmetro de partícula na faixa de tamanhos pré-estabelecida.

Aplicando-se integral na Equação 10 obtém-se a Equação 11, conforme descrito por Oliveira et al (2015). Através das faixas de diâmetros pré-estabelecidas pode-se obter o número de partículas e, deste, encontrar o parâmetro representativo da *DTP*.

$$N = \frac{A}{-\beta+1} (d_{i+1}^{-\beta+1} - d_i^{-\beta+1}) \quad (11)$$

Em que:

N – Número de partículas medidas;

A – coeficiente de densidade da equação de potência;

β – coeficiente de inclinação da equação de potência;

d_i – diâmetro médio geométrico da faixa de diâmetro i ;

d_{i+1} – diâmetro médio geométrico da faixa de diâmetro $i+1$.

De acordo com Oliveira et al. (2015), fazendo-se uso da ferramenta *Solver* do *MS Excel*[®], para regressão não linear, aplicada a Equação 11, obtém-se o parâmetro β que caracteriza a *DTP*.

Segundo Crittenden et al. (2012), um valor positivo de β representa o domínio de partículas maiores, um valor de β igual a 1 representa a distribuição homogênea e valor negativo representa domínio de partículas menores.

Bouyer et al. (2005) perceberam que diferentes características dos flocos poderiam ser determinadas através da análise de imagens, que apesar de informações bidimensionais, como a área, era possível obter informações secundárias que podiam ser representativas. Segundo os autores, o diâmetro equivalente dos flocos pode ser determinado pela Equação 12.

$$d = \left(\frac{4A}{\pi}\right)^{1/2} \quad (12)$$

Em que:

d - diâmetro equivalente do floco (mm);

A - área do floco representada na imagem (mm²).

A primeira característica de um conjunto de flocos é o diâmetro médio do floco, representado pela relação na Equação 13.

$$d_m = \frac{\sum_{i=1,k} d_i}{k} \quad (13)$$

Em que:

d_m - diâmetro médio de flocos (mm);

d_i - diâmetro equivalente do floco (mm);

k - representa o número de flocos detectados na imagem.

3.4 ANÁLISE E TRATAMENTO DE IMAGENS

Junker (2006) cita diversas metodologias empregadas na determinação da *DTP* como ultrassom, análise óptica de imagem, medição mecânica direta, utilização de laser para espalhamento de luz e da análise digital de imagens. Cada método fornece dados precisos de tamanhos de partículas e uma série de parâmetros a serem estudados.

Pratisinis et al. (1996) adotaram a técnica de análise digital de imagens para analisar a estrutura e tamanho dos flocos quanto à taxa de cisalhamento durante o processo de floculação.

Já Chackraborti et al. (2003), Nan e He (2012) e Z.Yang et al. (2013) utilizaram um sistema óptico não intrusivo aliado a análise digital de imagens. Os primeiros avaliaram a dimensão fractal dos flocos num dado intervalo de tempo, enquanto que Nan e He (2012) investigaram a distribuição do tamanho de partículas e das propriedades e estruturas dos flocos. Já os últimos, pesquisaram um novo método de cálculo das constantes cinéticas de floculação baseado nas teorias fractal e de Smoluchowski (1917).

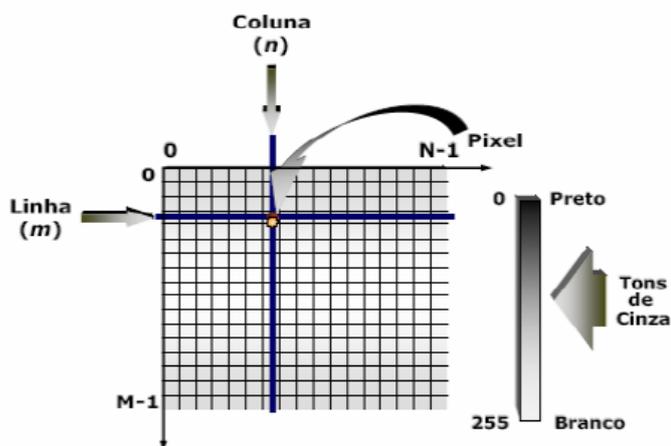
Bouyer et al. (2005) e Xiao et al. (2011) adotaram um sistema *PIV* (*particle image velocimetry*) no qual consiste em uma técnica não intrusiva de captação de imagem através do rastreamento de partícula e iluminação a laser. Bouyer et al. (2005) pesquisaram sobre a evolução do tamanho dos flocos enquanto Xiao et al. (2011) acompanharam a dinâmica de floculação através da *DTP* para diferentes coagulantes.

M.Yao et al. (2014) utilizaram uma técnica não intrusiva de aquisição de imagens com a utilização de uma lâmpada estroboscópica para iluminação das partículas. Os autores investigaram acerca da relação entre a *DTP* e a turbidez da água de estudo.

Rahman et al. (2014) utilizaram a técnica de holografia óptica para captação de imagem volumétrica (*3D*) das partículas em alta resolução espacial. Eles analisaram o efeito da concentração e turbidez das partículas, assim como o tamanho dos flocos gerados.

Uma imagem digital pode ser considerada como sendo uma matriz de pontos elementares, em que cada ponto recebe o nome de *pixel*. Quanto maior a quantidade de *pixels* melhor a resolução da imagem e conseqüentemente maior o seu tamanho. Cada *pixel* é representado por um valor que indica a intensidade de brilho, denominado nível de cinza, e a quantidade de níveis de cinza depende da quantidade de bits usada na representação de cada *pixel*. A Figura 6 ilustra a representação de uma imagem digital (SOUZA E CORREIA, 2007).

Figura 6 – Representação de uma imagem digital



Fonte: Souza e Correia, 2007.

De acordo com Moruzzi e Reali (2007), na atualidade, as câmeras apresentam 256 níveis de cinza representados pelo modo 8 bits ($2^8 = 256$).

Os autores ainda afirmam que, para determinação da *DTP* por meio da análise de imagens, é necessário efetuar o procedimento de calibração da imagem, que corresponde à informação do tamanho da distância entre pontos, anteriormente da etapa de aquisição.

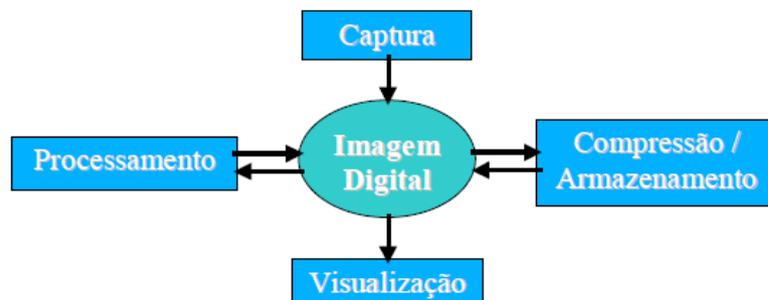
Após a captura da imagem, o próximo passo é a limiarização, que consiste em converter imagens em tons de cinza para imagens binárias, por isso também é conhecida como binarização. A forma mais simples de limiarização consiste em converter os *pixels* cujo tom de cinza é maior ou igual a um valor de limiar em brancos e os demais em pretos (MARQUES FILHO E VIEIRA, 1999).

De acordo com Souza e Correia (2007), as condições da imagem, como contraste, iluminação, complexidade da cena; e também o resultado esperado com a limiarização influenciam na escolha do limiar. A limiarização reduz tanto a quantidade de dados a serem tratados, facilitando a extração da informação procurada, quanto o tamanho da imagem em *bytes*, que contribui para otimização das demais etapas do processamento digital.

Padilha (1998) afirma que o nível de cinza é o parâmetro base de classificação de um histograma de uma determinada propriedade a ser investigada. O autor diz que dessa maneira é possível identificar o quanto uma imagem é escura, clara ou de níveis intermediários, visto que o histograma de uma imagem traduz a distribuição estatística dos seus níveis de cinza, ou seja, se o nível de cinza l ocorre n_l vezes em uma imagem com n pixels, podemos estimar a probabilidade de ocorrência do nível l na imagem por intermédio de sua frequência relativa.

O processamento digital de imagens pode ser dividido em etapas conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Etapas do processamento digital de imagens



Fonte: Autor (2017)

De acordo com Gonzales (2002), a captura da imagem consiste na utilização de dispositivos físicos sensíveis a espectros de energia eletromagnética que convertem sinal elétrico para um formato digital, como *Scanners* e câmeras digitais. O processamento, segundo o mesmo autor,

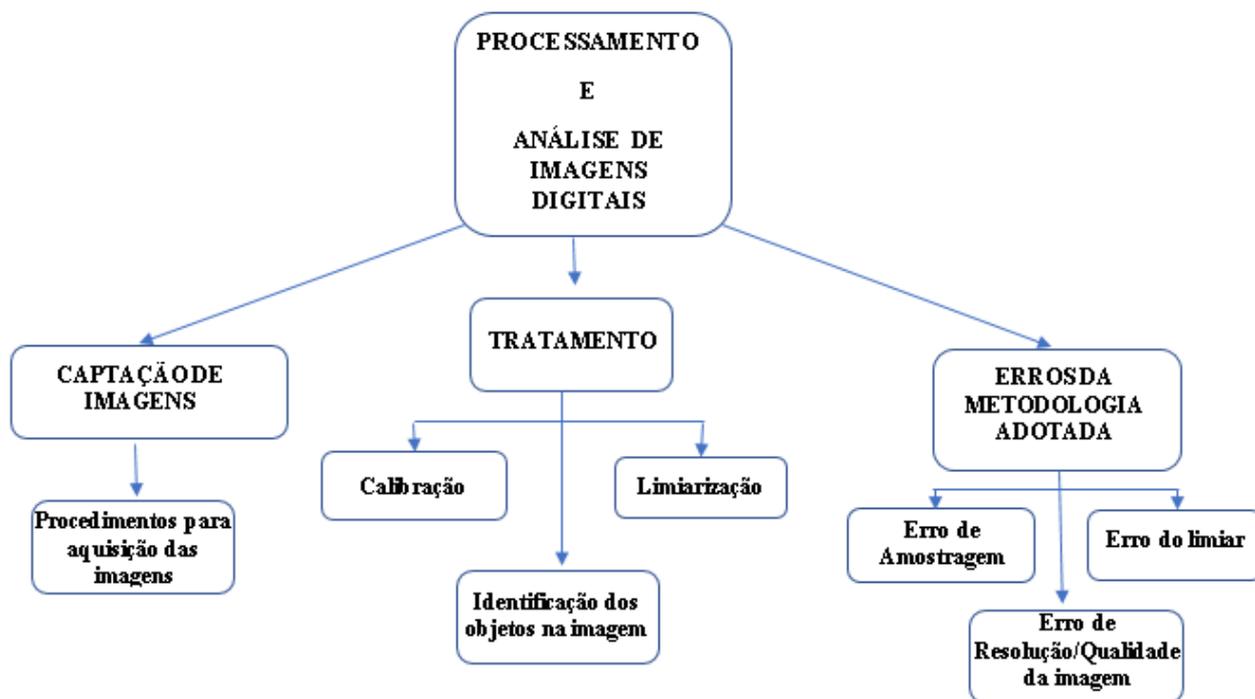
é voltado para o realce da imagem, enfatizando características de interesse, a identificação e classificação dos objetos contidos nas imagens.

Vários *softwares* podem ser utilizados na etapa de tratamento de imagens como por exemplo o *Image Tools* e o *Image J*.

4 METODOLOGIA

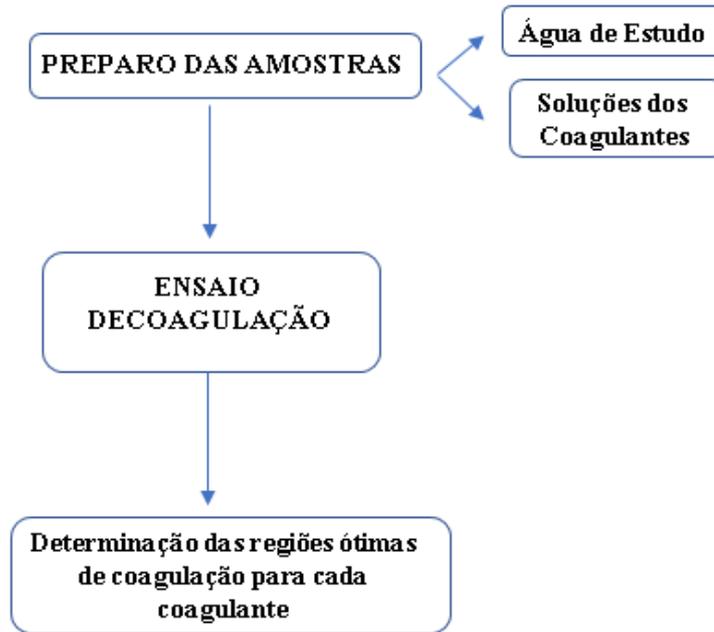
Os fluxogramas das Figuras 8, 9 e 10 ilustram os processos executados para obtenção dos resultados do presente trabalho. Enquanto o primeiro esquema retrata os processos envolvidos no processamento e na análise das imagens digitais, os demais mostram as atividades envolvidas para obtenção dos parâmetros cinéticos em função do número de partículas da primeira classe de tamanho.

Figura 8 – Fluxograma dos processos envolvidos na análise de imagens digitais



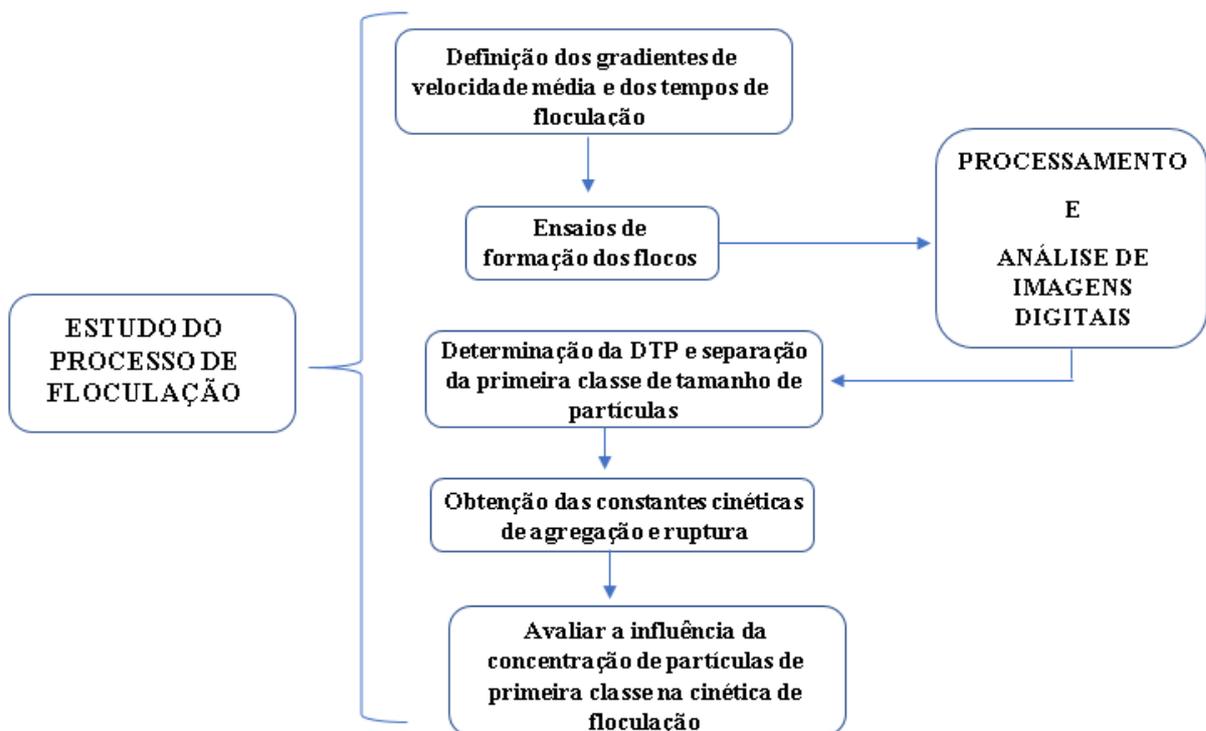
Fonte: Autor (2017)

Figura 9- Fluxograma dos processos envolvidos no ensaio de floculação



Fonte: Autor (2017)

Figura 10- Fluxograma dos processos envolvidos no estudo do processo de floculação



Fonte: Autor (2017)

4.1 Materiais e Equipamentos

Foram utilizados Sulfato de Alumínio Sólido Comercial $Al_2(SO_4)_3 \times 16 H_2O$, Cloreto Férrico sólido comercial $FeCl_3$ e o Policloreto de Alumínio (*PAC*) $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$, na qual a relação $m/3n \times 100$ representa a basicidade do produto, como coagulantes. Foram preparadas soluções com os referidos produtos químicos com concentrações finais de 46,708 g/L para o SA, 5,81 g/L para o CF e 24 g/L para o *PAC*.

Para correção de *pH* foram utilizadas soluções de Ácido Clorídrico (*HCl*) e Hidróxido de Sódio (*NaOH*), ambas com concentrações de 0,1 mol/L e 0,5 mol/L. As soluções foram preparadas semanalmente, com água deionizada. Para conferir a turbidez à água de estudo foi utilizada Caulinita.

Os equipamentos utilizados para execução dos ensaios e para medir os parâmetros, estão descritos a seguir:

- ✓ Turbidímetro modelo AP 2000 da marca *PoliControl* e cubeta para medição de turbidez;
- ✓ pHmetro modelo *PHS-3E* da marca *EVEN*;
- ✓ Reatores estáticos de bancada, jarrest, da marca NOVA ÉTICA, modelo 218/6lbd, com seis jarros com capacidade de 2L cada, providos de eixos com paletas e rotações de variação programável entre 20 e 600 rpm. Cabe ressaltar que as rotações das paletas são ajustadas por um controlador digital;
- ✓ Laser da marca Zhong Heng, modelo *PMLF 303*, com potência de 35000MW;
- ✓ Câmera digital da marca *Nikon*, modelo *D5500RM*, de resolução máxima de 6000 X 4000 *pixels*;

4.2 Obtenção dos parâmetros cinéticos em função do número de partículas da primeira classe de tamanho

4.2.1 Preparo das amostras

4.2.1.1 Água de Estudo

Na preparação da água de estudo utilizou-se água deionizada, na qual foi empregada uma suspensão de caulinita para conferir a turbidez desejada, conforme metodologia sugerida por Pádua (1994). Fez-se a diluição da caulinita em 2L de água deionizada e em seguida a solução foi agitada em agitador magnético por um período de 8h. Após 12 horas de repouso, efetuou-se a coleta do material sobrenadante da solução mãe. A turbidez da solução mãe foi de 5000 ± 200 uT sendo que para água de estudo foram necessários 8 mL para produção de 1L de água com turbidez de $6,5 \pm 2$ uT.

4.2.1.2 Soluções dos coagulantes

Para determinação das dosagens de coagulante foram realizadas soluções com Sulfato de Alumínio Comercial $Al_2(SO_4)_3 \times 14 \text{ à } 16 H_2O$ com dosagens com intervalo de 0,25 mL de solução de *SA* ($0 \leq SA \leq 5$ mL). Os ensaios com Cloreto Férrico $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ foram efetuados com dosagens de 0,5 mL de solução *CF* ($0 \leq CF \leq 10$ mL). Para o Policloreto de Alumínio, foram feitas dosagens de 1 mL de solução *PAC* ($0 \leq PAC \leq 12$ mL).

Ressalta-se que para todos os coagulantes utilizados a faixa de *pH* variou de 4 a 9.

4.2.2 Ensaio de Coagulação

Para realização desse ensaio adotou-se a metodologia de ensaio de *Jartest* descrita por Di Bernardo et al. (2002), tendo sido adotada a varredura como mecanismo de coagulação.

Foram adotados tempo de mistura rápida (*T_{mr}*) igual a 10 segundos, gradiente de velocidade médio da mistura rápida (*G_{mr}*) igual a 1000 s^{-1} , *T* igual a 20 minutos, gradiente médio de floculação (*G*) igual a 35 s^{-1} e efetuou-se a coleta das amostras correspondentes à velocidade

de sedimentação de $2,5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ para todos os coagulantes estudados, visto que tal velocidade, geralmente, corresponde à taxa de aplicação superficial adotada nos decantadores convencionais.

O equipamento *jartest* utilizado para realização do ensaio possui paletas giratórias com ajuste de rotação e painel digital, que permite G entre 10 s^{-1} e 2000 s^{-1} .

O equipamento dispõe de 6 (seis) recipientes graduados com volume de 2L cada, que possuem mangueiras de silicone, localizadas a uma determinada altura nos mesmos, com finalidade de coletar as amostras tanto no início da sedimentação, para realização das análises de pH , quanto no final para análise das velocidades de sedimentação e remoção de turbidez para os parâmetros adotados.

Embora o equipamento seja provido de programação os ensaios foram realizados no modo manual.

Através dos dados obtidos plotou-se o diagrama de coagulação a partir de curvas de isoeficiências de turbidez, determinando-se, desse modo, os pares de valores de pH de coagulação ótimo e dosagem de coagulante, correspondentes as regiões de maior eficiência de remoção.

4.2.3 Estudo do processo de floculação

4.2.3.1 Definição dos gradientes de velocidade média e dos tempos de floculação

Foram adotados tempos de mistura rápida de 10 s, de floculação de 20 min, gradiente de mistura rápida de 1000 s^{-1} , variando-se apenas os gradientes de velocidade médio, que foram de 20, 30, 40 e 80 s^{-1} .

4.2.3.2 Ensaio de Formação dos Flocos

Para o ensaio de formação dos flocos foram adotados os pares de valores ótimos determinados de acordo com o diagrama de coagulação de cada coagulante, isto é, o par de valores correspondentes à região ótima caracterizada pela ocorrência da formação de flocos.

A aquisição das imagens foi realizada a cada minuto durante os dez primeiros minutos. Após este, a aquisição passou a ser efetuada nos tempos de 15, 20, 30, 40, 50 e 60 min.

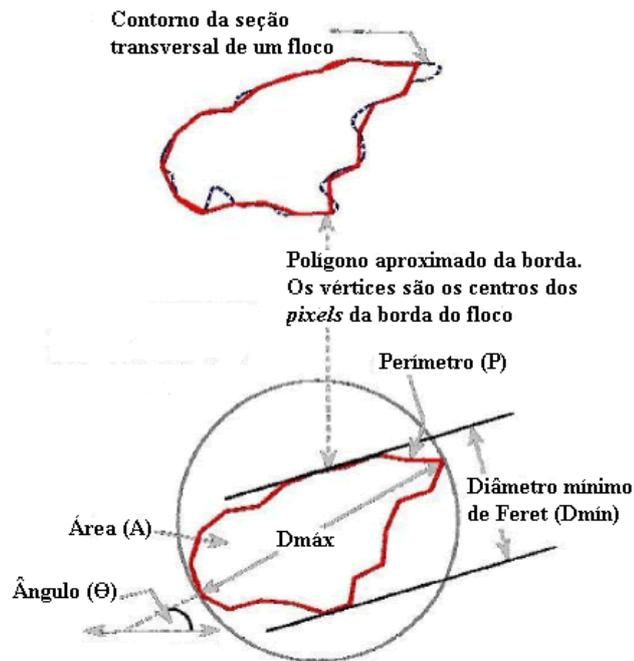
Uma vez terminado o ensaio, iniciou-se a análise e o tratamento das imagens captadas. Procedimentos, estes, descritos no item 4.3 – Processamento e análise das imagens digitais.

Repetiu-se o ensaio para cada valor de gradiente de velocidade médio supracitado no item 4.2.3.1.

4.2.3.3 Determinação da *DTP* e separação das partículas da primeira classe de tamanho

Para a determinação da distribuição do tamanho de partículas utilizou-se, como parâmetro base, o diâmetro médio dos flocos, representado no *software Image Tools*, pelo diâmetro de *Feret*, correspondente à média da distância entre duas linhas paralelas tangentes à projeção da partícula, equivalente ao diâmetro de um círculo com a mesma área da partícula (Ver Figura 11). A Equação (14) apresenta a fórmula utilizada, pelo *software* em questão, para o cálculo do referido diâmetro.

Figura 11 – Parâmetros geométricos da seção transversal de um floco



Fonte: Adaptado de YEPES et al. (2009)

$$D_{feret} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (14)$$

Em que:

D_{feret} - diâmetro de Feret ou diâmetro equivalente do floco (μm);

A - área do floco representada na imagem (μm^2).

Os dados foram classificados em 16 classes de tamanho com variação de 80,0 μm com menor faixa de 13,4 a 95,0 μm e a maior de 1157,0 a 1238,0 μm , como será apresentado no item 5.2.2 pela Tabela 8. Cabe ressaltar que tais classes de tamanhos foram mantidas para todos os coagulantes utilizados no estudo, afim de validar a comparação dos resultados obtidos.

Como o objetivo do trabalho é a obtenção dos parâmetros cinéticos de partículas de primeira classe na cinética de floculação, considerou-se que a menor faixa de valores pode ser representativa de partículas primárias.

Assim, ordenou-se as partículas de primeira classe correspondentes a cada tempo de floculação e para cada gradiente médio de velocidade estipulados nos itens anteriores.

Através de ferramentas estatísticas descritivas analisou-se o comportamento das concentrações de partículas de primeira classe para cada gradiente médio de velocidade correspondente.

4.2.3.4 Obtenção das constantes cinéticas de agregação e ruptura para partículas de primeira classe

De acordo com Argaman e Kaufman (1970) e Bratby et al. (1977), na determinação das constantes cinéticas de agregação e ruptura foram avaliadas as condições de sedimentabilidade dos flocos para cada gradiente de velocidade médio e da relação entre a turbidez inicial da água (N_0) e a turbidez remanescente da água tratada (N). Dessa maneira, a eficiência de tratamento após sedimentação foi estabelecida em termos de N_0/N .

Já no presente trabalho, a determinação das constantes cinéticas de agregação e ruptura foram avaliadas de maneira direta ao analisar a maior quantidade de partículas observadas na primeira classe de tamanho (N_0), dentre todos os gradientes de floculação adotados, e a quantidade de partículas de primeira classe para cada tempo de floculação investigado (N), de todos os gradientes do estudo. O desempenho do processo de floculação foi estabelecido por meio da relação N_0/N , sendo que foi considerada a condição de equilíbrio dinâmico dos flocos, determinada conforme modelo proposto por Bratby et al.(1977) (Equação 1).

Em seguida, utilizou-se o *software Origin 8.1*, método de convergência não linear, para obter as constantes cinéticas K_A e K_B convergindo para os valores de desempenho do processo de floculação anteriormente definidos. Ressalta-se que foram utilizados valores iniciais das constantes cinéticas apresentadas por Crittenden et al. (2012) na Tabela 2 do item 3.2 para calibração do modelo. Um vez calibrado, o modelo matemático possibilitou a obtenção dos valores de K_A e K_B em função do tempo de floculação e do conjunto de todos os gradientes

médios de velocidade do estudo, isto é, os valores de K_A e K_B são representativos de todos os gradientes médios de velocidade.

Posteriormente, utilizou-se o programa *Microsoft Excel*[®] para plotar os gráficos de eficiência da floculação para os diferentes valores de G investigados.

Outro modo de se obter as constantes cinéticas de agregação e ruptura foi por meio da função *Solver*, método de convergência *GRG* - não linear do programa *Microsoft Excel*[®], que define os valores de K_A e K_B em função do tempo de floculação e de cada valor de gradiente de velocidade médio em separado, ou seja, para cada G são determinados os valores das constantes cinéticas de agregação e ruptura. A calibração do modelo se deu a partir dos valores iniciais de K_A entre 10^{-8} e 10^{-20} , conforme sugerido por Di Bernardo et al. (2005).

Cabe ressaltar que para ambas metodologias adotadas na obtenção das constantes cinéticas do estudo, não foram realizadas validações de ajuste das calibrações efetuadas.

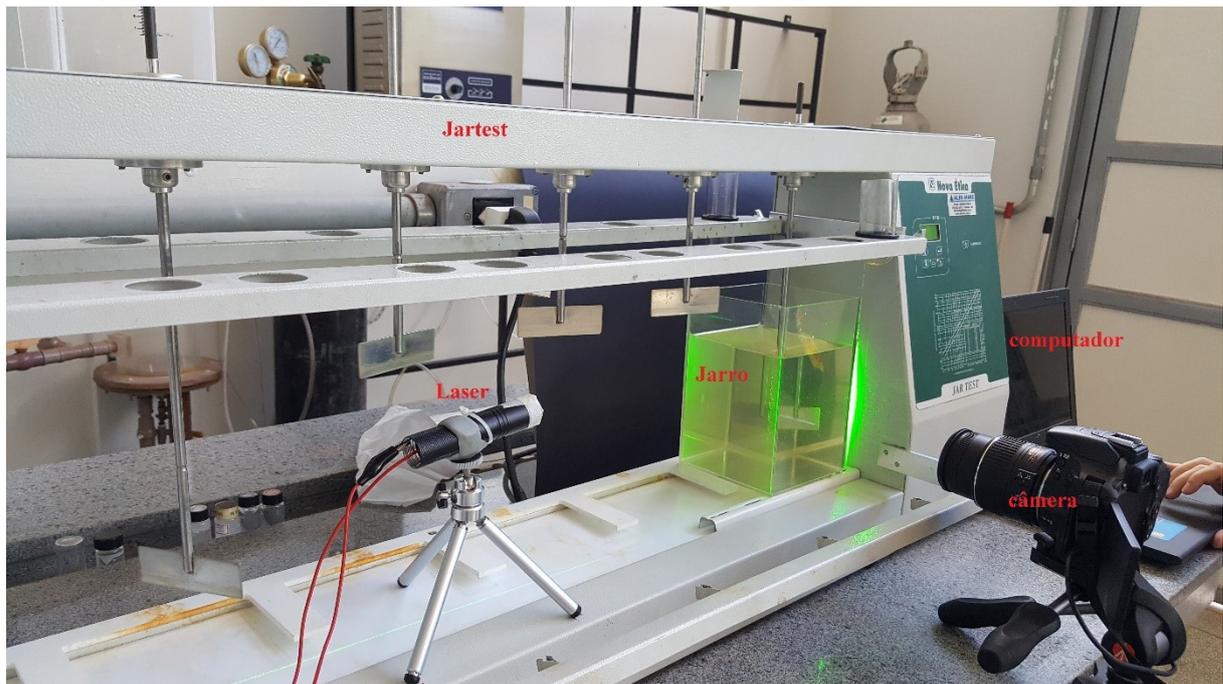
4.3 Processamento e análise das imagens digitais

4.3.1 Captura das Imagens

4.3.1.1 Preparo do equipamento para aquisição das imagens

Para aquisição das imagens foi utilizado um sistema não intrusivo composto por câmara digital, plano de luz e equipamento *Jartest* conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Instalação do equipamento para aquisição das imagens



Fonte: Autor (2017)

O plano de luz era perpendicular ao plano de aquisição das imagens para melhor visualização dos flocos e eliminação de distorções nas imagens e apresentava espessura de aproximadamente de 2 mm. Para a aquisição das imagens foi utilizada uma câmera digital conectada ao computador, onde eram efetuados os ajustes de resolução, velocidade de captura das imagens, frequência, dentre outros parâmetros necessários para captura dos flocos durante a execução do ensaio. Para o tratamento das imagens foi utilizado o *software freeware Image Tools 3.0*.

4.3.1.2 Procedimentos para aquisição de imagens

As imagens dos flocos foram captadas nos 10 (dez) segundos finais dos tempos de floculação à uma taxa de 4 fotos por segundo (na resolução máxima da câmera fotográfica, de 6000 x 4000 *pixels*), ou seja, foram obtidas e avaliadas 40 (quarenta) fotos a cada momento de aquisição pré-estabelecido.

Foi escolhido um histograma que caracterizasse uma imagem em preto e branco para minimizar possíveis interferências associadas aos agregados formados no ensaio. Também fora adotado a maior abertura de obturador possível da câmera sendo de 5.6, assim a captura de todos os flocos contidos no plano de luz formado no recipiente.

As imagens foram avaliadas em conjunto para comporem um espaço amostral representativo das condições reais dos agregados no momento da obtenção. Considerou-se que o intervalo de tempo de dez segundos não é suficiente para alterações significativas das características dos flocos.

4.3.2 Tratamento de Imagens

O tratamento e análise das imagens obtidas foram realizados com auxílio do *software freeware Image Tool 3.0*. Este, é um programa de processamento e análise de imagens com funcionalidades para adquirir, exibir, editar, analisar, processar, calibrar, comprimir, copiar e imprimir as imagens em escala de cinza e cor.

As funções de análise de imagem incluem ainda dimensões tais quais: distância, ângulo, perímetro e área; medidas de escala de cinza – ponto, linha e área de histograma com estatísticas. O programa suporta funções de processamento de imagem padrão, como manipulação de contraste, nitidez, suavização, detecção de bordas, filtragem mediana, dentre outras.

Os resultados foram extraídos no formato *txt* e foram tratados em planilhas eletrônicas do *MS Excel*[®] conforme a necessidade do estudo.

O estudo conduzido nessa pesquisa baseou-se no método proposto por Moruzzi (2005), o qual contém os procedimentos descritos a seguir: aquisição ou captura de imagens; tratamento digital; calibração; determinação dos parâmetros de interesse.

Em síntese, o método do referido autor consiste na projeção de um plano de iluminação de luz fria – Laser - para melhor visualização dos flocos, seguido da aquisição das imagens através de uma câmera digital. O processamento das mesmas ocorre através de um software específico, *Image Tools 3.0*, gratuito, disponível na internet. Por fim, efetua-se a análise dos resultados obtidos.

4.3.2.1 Calibração

Esta etapa é fundamental para o processo de análise de imagem por informar o tamanho correspondente a uma distância entre dois pontos.

Anteriormente a execução de cada ensaio de formação de flocos, efetuava-se a calibração do sistema, para cada gradiente de velocidade médio adotado, por meio da captura da imagem com uma régua, graduada em centímetros.

4.3.2.2 Limiarização

Tal etapa tem como objetivo transformar a imagem de 1 bit (imagem em preto e branco) eliminando possíveis interferências não relacionadas aos flocos gerados.

O limiar varia de 0 a 255 tonalidades de cinza e foi determinado para cada conjunto de fotos correspondentes aos respectivos gradientes médios de velocidade.

4.3.2.3 Identificação dos objetos na imagem

O *software* utilizado no tratamento das imagens possui vários parâmetros que caracterizam as partículas, dentre eles, optou-se pela área, perímetro e dos diâmetros máximo, mínimo e médio, este representado pelo diâmetro de *Feret*.

Tais parâmetros subsidiaram o estudo para obtenção dos parâmetros cinéticos em função do número das partículas de primeira classe de tamanho no processo de floculação.

4.3.3 Erros da metodologia adotada

De acordo com Moruzzi et al. (2010) durante as etapas de captura e tratamento das imagens podem ocorrer alguns erros, sendo eles: erro amostral e erro da metodologia de análise e tratamento, principalmente na definição do limiar.

A seguir serão abordados os erros inerentes à metodologia adotada.

4.3.3.1 Erro da Resolução

Tal erro é referente a resolução adotada para aquisição das imagens, tendo como base a área dos *pixels* que constituem o tamanho médio dos flocos capturados. O erro foi calculado relacionando-se a área de *pixels* com a área da partícula. Ressalta-se que os valores correspondentes ao tamanho de um *pixel* e a área do mesmo foram de 12,023 μm e 144,55 μm^2 , respectivamente.

Das Equações (15) e (16) determinaram-se os erros de resolução subestimando e superestimando a área do objeto.

$$E = \left(\frac{D_{real} - D_{subestimado}}{D_{real}} \right) 100 \quad (15)$$

Em que:

E – Erro de Resolução (%);

D_{real} – Diâmetro real do objeto em μm ;

$D_{subestimado}$ – Diâmetro subestimado do objeto em μm .

$$E = \left(\frac{D_{real} - D_{superestimado}}{D_{real}} \right) 100 \quad (16)$$

Em que:

E – Erro de Resolução (%);

D_{real} – Diâmetro real do objeto em μm ;

$D_{superestimado}$ – Diâmetro superestimado do objeto em μm .

4.3.3.2 Erro do Limiar

Para definição do erro do limiar foi efetuada a limiarização para três grupos de imagens, cada grupo correspondente a um coagulante utilizado no estudo e contendo cinco imagens cada, totalizando 15 imagens. Cabe ressaltar que as imagens selecionadas de cada grupo possuem o mesmo valor de gradiente médio de velocidade. A escolha das mesmas foi de maneira aleatória.

Para as imagens de cada grupo, foi definido o limiar de binarização e realizado o tratamento para a obtenção dos parâmetros mencionados no item 4.3.2.3. Tal procedimento foi realizado por três indivíduos que ao final da análise resultou em três leituras distintas.

Dessa maneira, o erro do limiar baseou-se na comparação do número de partículas e do diâmetro médio obtidos pelos três indivíduos. Assim, pela Equação (17) definiu-se o erro de limiarização no tratamento de imagens.

$$E = \left(\frac{L_{m\acute{a}x} - L_{m\acute{i}n}}{L_{m\acute{a}x}} \right) 100 \quad (17)$$

Em que:

E – Erro de Limiarização (%);

$L_{m\acute{a}x}$ – Leitura máxima do parâmetro (Número de partículas ou diâmetro médio);

$L_{m\acute{i}n}$ – Leitura mínima do parâmetro (Número de partículas ou diâmetro médio).

4.3.3.3 Erro de Amostragem

O erro de amostragem refere-se a representatividade da amostra estudada. Sua determinação deu-se através da análise e tratamento das 40 imagens obtidas no tempo de floculação de 40 minutos (visto que não houve alterações significativas na formação dos flocos a partir de 20 minutos) para cada gradiente médio de velocidade (20, 30, 40 e 80 s⁻¹), para os três coagulantes adotados na pesquisa. Foram feitas a análise e o tratamento das 5 primeiras imagens, e em seguida das 10, 15, 20, 35 e 40 imagens subsequentes.

Para o cálculo do erro amostral foi avaliado o diâmetro médio, sendo adotada a Equação (18) para determinação.

$$E = \left(\frac{L_{m\acute{a}x} - L_{m\acute{i}n}}{L_{m\acute{a}x}} \right) 100 \quad (18)$$

Em que:

E – Erro de Amostragem (%);

$L_{m\acute{a}x}$ – Leitura do diâmetro médio obtido para 40 imagens ;

$L_{m\acute{i}n}$ – Leitura do diâmetro médio obtido para i imagens com i igual a 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização dos experimentos e da trabalhabilidade com os dados obtidos foram determinados os resultados deste trabalho, os quais serão apresentados através de dois tópicos: processamento e análise das imagens digitais, onde serão discutidos os resultados do tratamento das imagens digitais e os erros referentes à metodologia empregada. A obtenção dos parâmetros cinéticos em função do número de partículas da primeira classe de tamanho, que abordará os dados obtidos dos ensaios de coagulação, a determinação da distribuição do tamanho de partículas juntamente com a separação e ordenação da primeira classe de tamanho para os

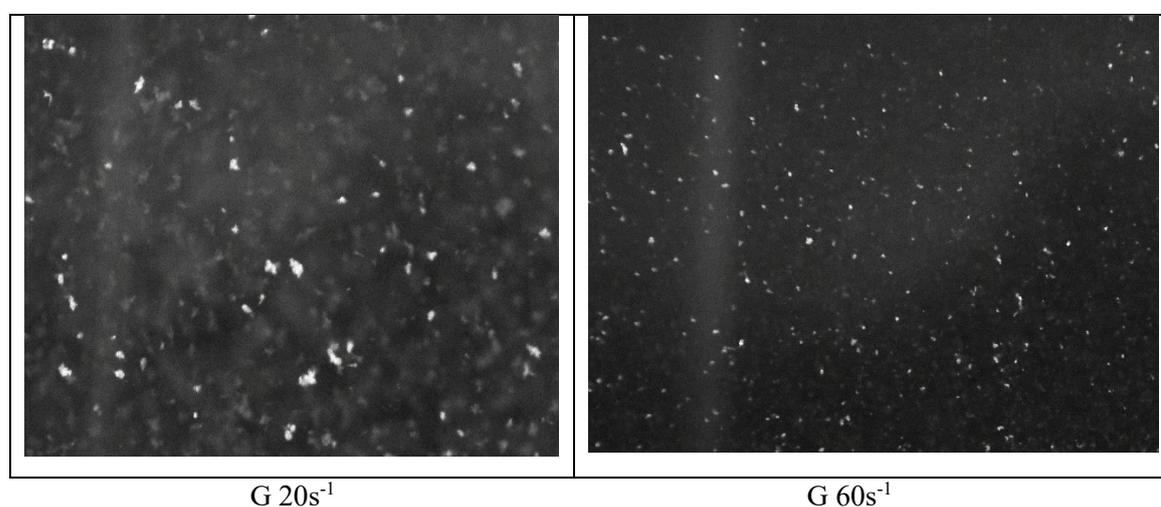
gradientes de floculação investigados, e por fim, a discussão acerca das constantes de agregação e ruptura obtidas através dos dois métodos descritos no capítulo anterior.

5.1 Processamento e análise das imagens digitais

5.1.1 Tratamento das imagens digitais

As imagens da Figura 13 ilustram a formação dos flocos para diferentes condições pesquisadas onde se percebe a variação do tamanho de partículas com a mudança do gradiente médio de velocidade de floculação.

Figura 13 – Imagens capturadas dos flocos formados para G igual a 20 s^{-1} e G igual a 60 s^{-1} com tempo de floculação (T) de 60 minutos para o sulfato de alumínio como coagulante

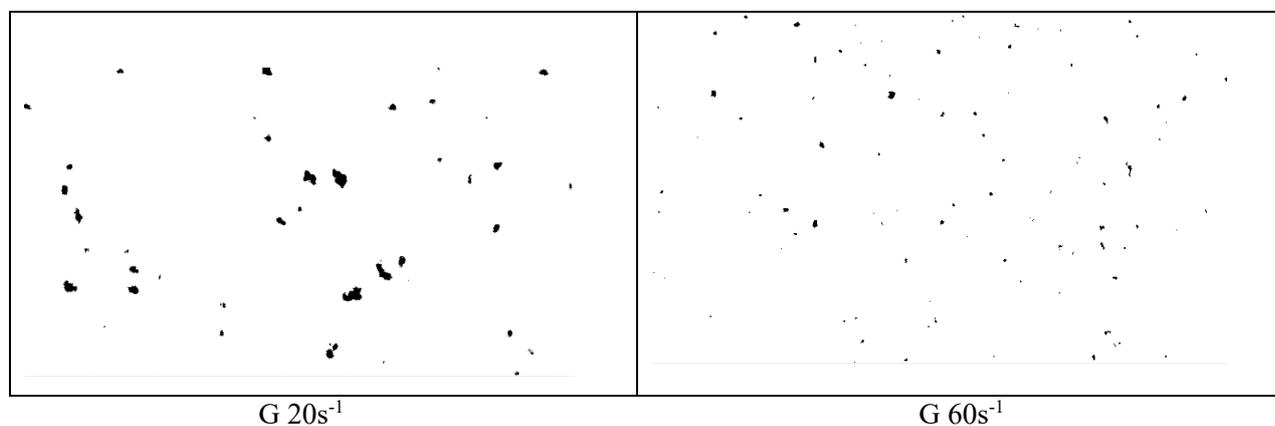


Fonte: Autor (2017)

As imagens da Figura 13 retratam o instante da aquisição das mesmas, sem tratamento no software *Image Tools*. Nota-se que os flocos contidos no plano de luz possuem brilho mais intenso que os demais, essa diferença de brilho nas imagens é corrigida com o tratamento adequado, que busca deixar aparentes apenas aqueles que encontram-se no referido plano. Observa-se que o aumento do gradiente de velocidade médio acarreta quebra dos flocos resultando em agregados menores.

A Figura 14 apresenta as imagens anteriores com o devido tratamento após seu processamento no *software Image Tools*.

Figura 14 – Imagens capturadas dos flocos formados para G igual $20s^{-1}$ e G igual $60s^{-1}$ com tempo de floculação (T) de 60 minutos para o sulfato de alumínio como coagulante, após processamento no *Image Tools*



Fonte: Autor (2017)

Como supracitado, com o tratamento das imagens, apenas os flocos contidos no plano de luz ficaram em destaque. Uma vez efetuado o tratamento das imagens obtidas para cada etapa do trabalho, foi feita a identificação dos objetos e definição dos parâmetros para caracterização das partículas, conforme descrito no item 4.3.2.3.

5.1.2 Erros da metodologia adotada

5.1.2.1 Erro da Resolução

Através da Tabela 4 nota-se que à medida que se aumenta a área do agregado, ou seja, o número de *pixels* que o representa, menor é o erro obtido.

Tabela 4- Erro de resolução da imagem

Quantidade de <i>pixels</i>	Diâmetro	Área Real	Área	Área	Erro	Erro
	Real (μm)	(μm^2)	Superestimada (μm^2)	Subestimada (μm^2)	Superestimado (%)	Subestimado (%)
1	12,02	113,52	144,50	0,00	12,82	-
2	24,04	454,09	578,00	0,00	12,82	-
4	48,09	1816,38	2312,00	578,00	12,82	43,59
8	96,18	7265,54	8670,00	4624,00	9,24	20,22
16	192,36	29062,16	31790,00	23698,00	4,59	9,70
32	384,72	116248,67	123692,00	105774,00	3,15	4,61

Fonte: Autor (2017)

Dessa maneira, pode-se afirmar que o erro, para a primeira classe de tamanho das partículas adotada no presente trabalho, é irrelevante, pois considerou-se que a menor partícula possui tamanho de um *pixel*, ou seja, todas as partículas pertencentes ao intervalo da classe 1 são representadas nas imagens. No presente trabalho pressupôs-se, como partículas primárias, todas as partículas constantes na classe 1. Além disso, as partículas com diâmetro próximo ao limite superior da classe 1 (95 μm) são representadas por aproximadamente 8 *pixels*, ou seja, erro máximo em torno de 12,5 %. Ressalta-se, portanto, que para o presente trabalho, este tipo de erro pode ser considerado desprezível.

5.1.2.2 Erro do Limiar

A definição do limiar de binarização teve influência direta nos parâmetros obtidos pela análise e tratamento das imagens capturadas. Os limiares escolhidos, pelos três indivíduos, para os três coagulantes empregados na pesquisa, assim como os parâmetros analisados para o cálculo do erro são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Erro de Limiarização, considerando observações isoladas de três indivíduos

Coagulante	Limiar de binarização	Diâmetro médio (μm)	Quantidade de flocos	Quantidade de flocos/imagem	Erro (%) baseado no diâmetro médio	Erro (%) baseado na quantidade de flocos
Sulfato de Alumínio	168	110,86	978	195,60	2,75	16,54
	170	109,54	987	197,40		
	185	84,95	1052	210,40		
Cloreto Férrico	158	213,28	357	71,40	9,56	1,79
	172	222,64	309	61,80		
	150	215,58	359	71,80		
Policloreto de Alumínio	186	74,62	213	42,60	29,63	25,64
	176	93,99	171	34,20		
	201	55,57	345	69,00		

Fonte: Autor (2017)

As escolhas dos limiares de binarização para o sulfato de alumínio, cloreto férrico e policloreto de alumínio apresentaram valores de desvio padrão iguais a 9,29%, 11,14% e 12,58%, respectivamente.

O erro baseado no diâmetro médio dos flocos apresentou média de 14,65% e um desvio padrão de 12,03%. Já o erro baseado na quantidade de flocos teve média de 13,98% e desvio padrão de 13,97%.

Na análise fica evidente o aumento do erro com o aumento do desvio padrão da escolha dos limiares de binarização. Tal fato ratifica a influência direta da definição do limiar nos parâmetros obtidos.

Entretanto, o efeito deste tipo de erro pode ser suavizado considerando-se que, para um mesmo observador, o erro é aplicado a todas as imagens e, portanto, a análise comparativa pode não sofrer alteração da mesma ordem de grandeza do erro ilustrado na Tabela 5.

5.1.2.3 Erro de Amostragem

A estimativa do erro de amostragem é obtida através da relação entre o diâmetro médio das partículas e o conjunto de imagens. Assim, através da Tabela 6 tem-se o resultado obtido para o erro amostral para os três coagulantes envolvidos na pesquisa e para todos os gradientes de velocidade médio estudados.

Para amostras de 40 imagens o erro amostral relativo à média apresentou valores menores que 0,48% para um intervalo de confiança de 95%. Nota-se que há um decréscimo do erro médio com o aumento do número de imagens, o que demonstra o quão importante é este aspecto na confiabilidade dos resultados obtidos.

Tabela 6 – Erro Amostral para os três coagulantes utilizados no estudo e para todos os valores de G

	Gradiente de 20 s-1			Gradiente de 30 s-1		Gradiente de 40 s-1		Gradiente de 80 s-1	
	Qtde de imagens	Diâmetro médio (µm)	Erro Dméd (%)						
Sulfato de Alumínio	5	132,45	13,60	112,58	5,51	108,88	13,25	104,10	5,00
	10	138,34	9,75	123,19	3,39	104,96	9,17	101,28	2,16
	15	144,57	5,69	129,14	8,38	105,23	9,45	100,60	1,47
	20	151,49	1,17	128,39	7,75	106,19	10,45	99,46	0,32
	25	150,69	1,70	123,31	3,49	102,56	6,68	98,17	0,98
	30	150,78	1,64	121,74	2,17	100,21	4,23	98,17	0,98
	35	154,24	0,62	120,68	1,28	97,98	1,91	98,63	0,51
	40	153,29	0,00	119,15	0,00	96,14	0,00	99,14	0,00
		MÉDIA	4,27		4,00		6,89		1,43
Cloreto Férrico	5	215,44	7,69	188,50	8,45	205,57	3,94	169,73	0,32
	10	231,77	0,70	187,69	7,98	194,62	1,60	169,83	0,25
	15	232,22	0,51	179,15	3,06	195,14	1,33	171,33	0,62
	20	238,40	2,14	179,26	3,13	193,83	2,00	167,48	1,64
	25	236,65	1,39	175,46	0,94	196,59	0,43	164,49	3,40
	30	238,22	2,06	176,09	1,31	196,93	0,07	165,84	2,60
	35	233,08	0,14	173,89	0,04	197,92	0,07	166,71	2,09
	40	233,40	0,00	173,82	0,00	197,78	0,00	170,27	0,00
		MÉDIA	1,83		3,11		1,18		1,36
PAC	5	73,27	42,71	65,84	16,05	106,91	8,48	149,04	3,63
	10	73,51	43,18	61,97	9,23	119,03	1,90	139,72	2,84
	15	78,98	53,84	59,73	5,28	113,94	2,46	136,08	5,38
	20	62,74	22,20	60,74	7,07	118,11	1,11	135,55	5,74
	25	53,36	3,94	61,48	8,37	115,39	1,22	139,58	2,94
	30	55,21	7,53	62,60	10,34	117,68	0,74	141,27	1,76
	35	52,41	2,09	59,14	4,24	116,31	0,43	142,96	0,59
	40	51,34	0,00	56,73	0,00	116,81	0,00	143,81	0,00
		MÉDIA	21,94		7,57		2,04		2,86

Fonte: Autor (2017)

5.2 Obtenção dos parâmetros cinéticos em função do número de partículas da primeira classe de tamanho

5.2.1 Ensaio de Coagulação

5.2.1.1 Determinação da dosagem de coagulante e pH de coagulação

A determinação da dosagem de coagulante e de *pH* de coagulação foi obtida segundo a metodologia descrita no item 4.2.2.

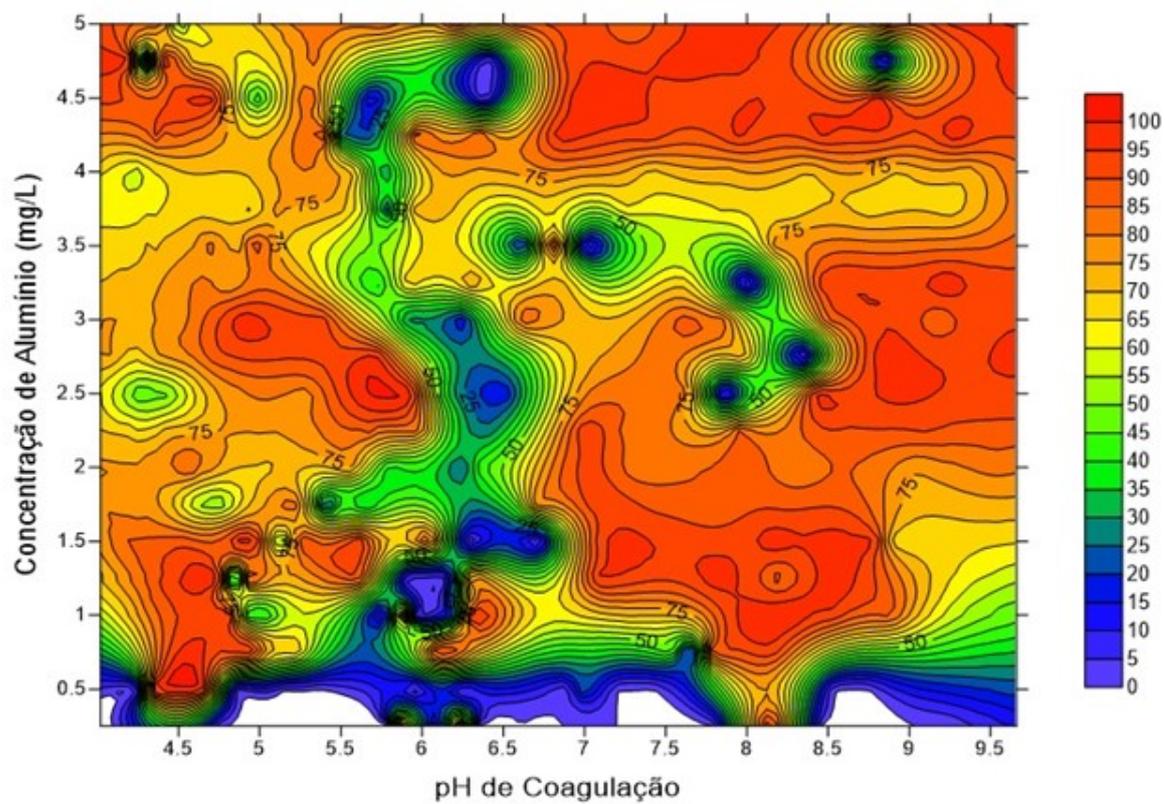
A Tabela 7 apresenta os pares de valores de dosagem de coagulante e *pH* de coagulação ótimo, correspondentes as regiões de maior eficiência de remoção para água de estudo. As figuras 15, 16 e 17 ilustram os diagramas de coagulação para o Al^{3+} , Fe^{3+} e o PAC, respectivamente.

Tabela 7 – Ensaio de coagulação

Coagulantes adotados	Número de Ensaios realizados	Quantidade de pontos obtidos	Dosagem ótima de coagulante	pH de coagulação	Turbidez Residual (uT)
Sulfato de Alumínio	63	378	2,50 mg de Al/L	6,50	1,04
Cloreto Férrico	40	240	5,20 mg de Fe/L	6,15	0,34
Policloreto de Alumínio	48	288	3,36 mg de Al/L	6,20	0,40

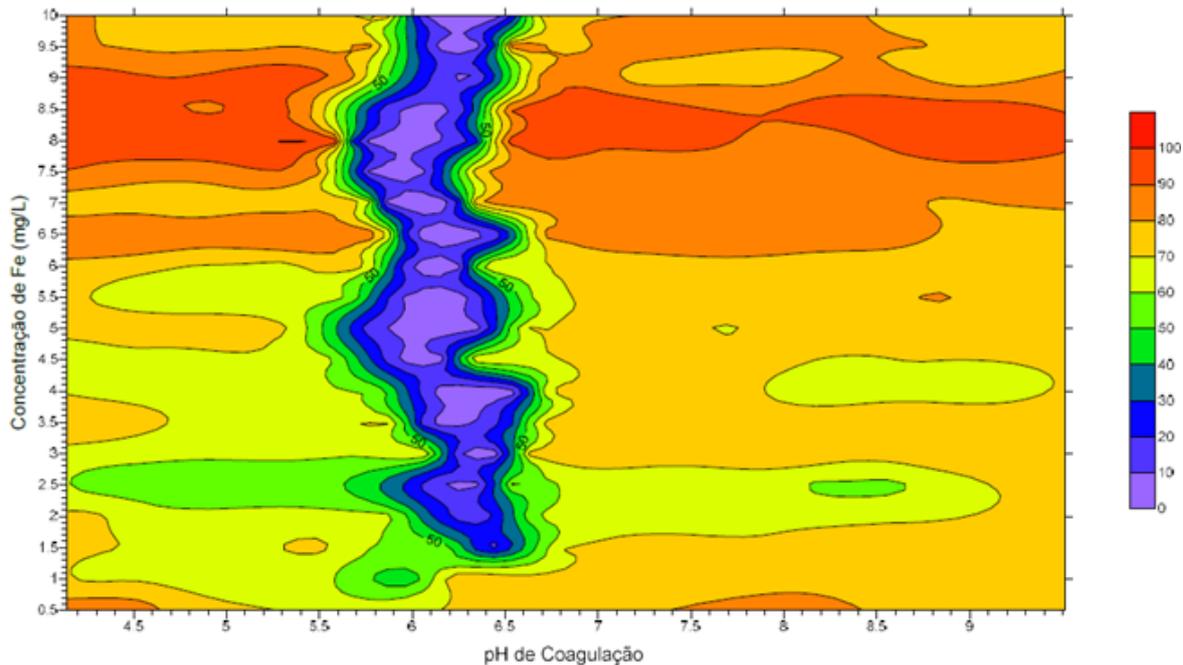
Fonte: Autor (2017)

Figura 15 – Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio para velocidade de sedimentação de $2,5 \text{ cm.s}^{-1}$



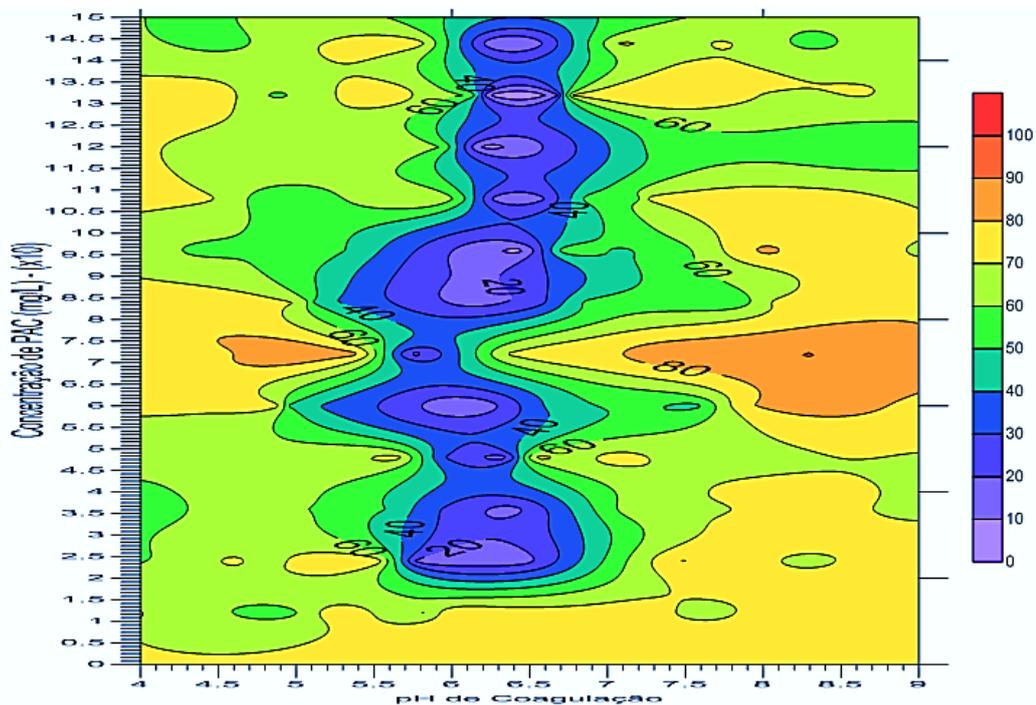
Fonte: Autor (2017)

Figura 16 – Diagrama de coagulação do cloreto férrico para velocidade de sedimentação de $2,5 \text{ cm.s}^{-1}$



Fonte: Autor (2017)

Figura 17 - Diagrama de coagulação do PAC para velocidade de sedimentação de $2,5 \text{ cm.s}^{-1}$



Fonte: Autor (2017)

De acordo com Armitharajah e Mills (1982) a região ótima para o sulfato de alumínio no mecanismo de varredura, é alcançada com dosagens de *pH* entre 6,0 e 8,0. Pela Tabela 6 observa-se que o valor do *pH* de coagulação determinado, para o sulfato de alumínio, encontra-se inserido neste intervalo. Outros autores como Crittenden et al. (2012) e Pavanelli (2001) também validam o resultado encontrado ao afirmarem que a menor concentração solúvel de Al^{3+} é obtida quando o *pH* é em torno de 6,0.

Já para o Policloreto de Alumínio, Pavanelli (2001) afirma que o coagulante pode apresentar valores ótimos de *pH* contidos numa faixa ampla de coagulação, *pH* igual a 5 até valores mais elevados em torno de 10, validando, assim, o valor de *pH* de coagulação determinado.

Pavanelli (2001) afirma que a menor concentração solúvel de Fe^{3+} , quando utilizado o cloreto férrico, é obtida quando o *pH* é mantido próximo de 6,0. O valor encontrado de 6,15 está próximo de tal valor.

Ressalta-se que a qualidade da água influi diretamente nas dosagens de *pH* e coagulante a serem utilizadas na formação de flocos, isto é, diferentes águas de estudo podem apresentar diferentes valores de dosagens de coagulantes e de *pH* de coagulação.

5.2.2 Determinação da DTP e separação das partículas da primeira classe de tamanho

A separação sucessiva das partículas por faixas de tamanho é a técnica para determinação da *DTP* onde se tem a possibilidade de analisar cada uma das frações e de se obter a quantidade total de partículas (OLIVEIRA, et al 2015).

Ao adotar a técnica de fracionamento, ordenou-se as classes de tamanho das partículas conforme apresentado na Tabela 8.

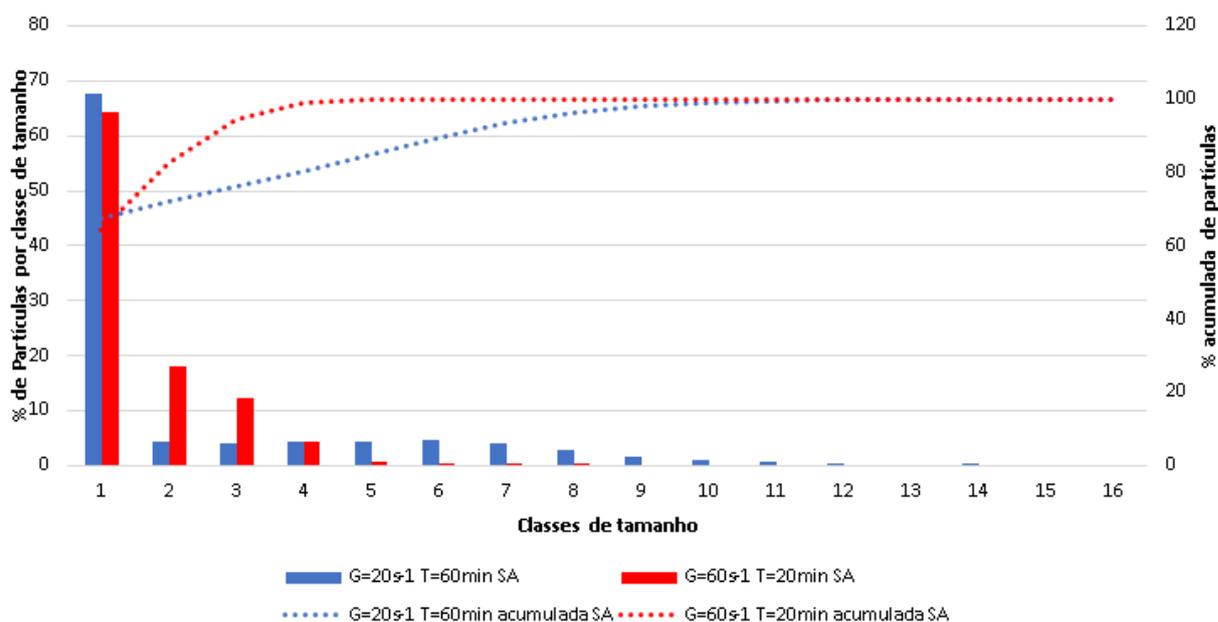
Tabela 8 – Classes de tamanho das partículas

Classes de tamanho	Limite Inferior (μm)	Limite Superior (μm)
1	13,43	95,09
2	95,09	176,75
3	176,75	258,41
4	258,41	340,07
5	340,07	421,73
6	421,73	503,40
7	503,40	585,06
8	585,06	666,72
9	666,72	748,38
10	748,38	830,04
11	830,04	911,70
12	911,70	993,37
13	993,37	1075,03
14	1075,03	1156,69
15	1156,69	1238,35
16	1238,35	-

Fonte: Autor (2017)

A Figura 18 ilustra um exemplo obtido da *DTP*, utilizando-se sulfato de alumínio com G igual a 20 s^{-1} e T igual a 60 minutos, e G igual a 60 s^{-1} e T igual a 20 minutos. Ressalta-se que foram avaliadas 40 imagens para cada gradiente médio de velocidade totalizando 5284 flocos para o G de 20 s^{-1} e 8192 flocos para G de 60 s^{-1} .

Figura 18 – Distribuição do tamanho de partículas obtidas para G de 20s^{-1} com T de 60min e G de 60s^{-1} com T de 20min



Fonte: Autor (2017)

Observa-se que há predominância da concentração de partículas de diâmetros menores para G de 60 s^{-1} , enquanto que para G de 20 s^{-1} observa-se uma distribuição mais uniforme com partículas de maiores diâmetros. Para valores pertencentes à classe 5 de tamanho de partículas, observa-se um acúmulo maior de concentração para os flocos de G de 60 s^{-1} , cerca de 99,71%, quando comparado com o G de 20 s^{-1} , 84,74%, demonstrando que o aumento do G acarreta em uma maior taxa de ruptura das partículas e na consequente predominância de menores valores de diâmetro. Para G de 60 s^{-1} o diâmetro médio das partículas foi de $85\text{ }\mu\text{m}$ enquanto que para o G de 20 s^{-1} o diâmetro médio fora de $151\text{ }\mu\text{m}$.

Bratby (1981) afirma que a *DTP* sofre influência direta da relação de agregação e ruptura dos flocos, onde o aumento de energia caracteriza predominância de menores tamanhos de partículas, conforme comprovado pelo gráfico da Figura 18.

Para o desenvolvimento do estudo da cinética de floculação baseado na influência da concentração de partículas primárias, consideradas neste trabalho como sendo as partículas de

primeira classe, foi necessário ordenar as mesmas em relação a cada tempo de floculação e cada gradiente médio de velocidade utilizado. As Tabelas 9, 10 e 11 apresentam tais dados para cada coagulante investigado. Neste estudo foram considerados os gradientes médios de velocidade de floculação de 20, 30, 40 e 80 s⁻¹.

Tabela 9 – Relação da quantidade de partículas primárias pelo tempo de floculação para o sulfato de alumínio como coagulante.

Sulfato de Alumínio		
G (s ⁻¹)	T (s)	Frequência Absoluta
20	60	4614
20	120	8792
20	600	1890
20	1200	2858
20	1800	2923
20	2400	2862
20	3000	3745
20	3600	3572
30	60	8638
30	120	3927
30	600	3022
30	1200	2237
30	1800	3774
30	2400	4595
30	3000	4798
30	3600	5350

Sulfato de Alumínio		
G (s ⁻¹)	T (s)	Frequência Absoluta
40	60	5291
40	120	2736
40	600	2818
40	1200	2330
40	1800	2993
40	2400	3557
40	3000	2551
40	3600	3365
80	60	6184
80	120	4610
80	600	3131
80	1200	2650
80	1800	5562
80	2400	7338
80	3000	6951
80	3600	9026

Fonte: Autor (2017)

Tabela 10 - Relação da quantidade de partículas primárias pelo tempo de floculação para o cloreto férrico como coagulante.

Cloreto Férrico		
G (s⁻¹)	T (s)	Frequência Absoluta
20	60	3131
20	120	1182
20	600	363
20	1200	316
20	1800	570
20	2400	482
20	3000	767
20	3600	821
30	60	3455
30	120	1566
30	600	877
30	1200	1139
30	1800	1706
30	2400	1848
30	3000	2086
30	3600	2009

Cloreto Férrico		
G (s⁻¹)	T (s)	Frequência Absoluta
40	60	3223
40	120	1094
40	600	625
40	1200	831
40	1800	1710
40	2400	1752
40	3000	2025
40	3600	2209
80	60	4208
80	120	1418
80	600	388
80	1200	441
80	1800	890
80	2400	1224
80	3000	1151
80	3600	1397

Fonte: Autor (2017)

Tabela 11- Relação da quantidade de partículas primárias pelo tempo de floculação para o Policloreto de Alumínio como coagulante.

Policloreto de Alumínio		
G (s⁻¹)	T (s)	Frequência Absoluta
20	60	8011
20	120	6015
20	600	1665
20	1200	2062
20	1800	301
20	2400	6764
20	3000	1543
20	3600	1461
30	60	3070
30	120	1515
30	600	6342
30	1200	2874
30	1800	3956
30	2400	5759
30	3000	3630
30	3600	3167

Policloreto de Alumínio		
G (s⁻¹)	T (s)	Frequência Absoluta
40	60	3232
40	120	2086
40	600	3565
40	1200	1589
40	1800	2773
40	2400	2386
40	3000	2690
40	3600	2243
80	60	2920
80	120	1138
80	600	518
80	1200	359
80	1800	717
80	2400	891
80	3000	1023
80	3600	1129

Fonte: Autor (2017)

Ao analisar as tabelas acerca do comportamento das partículas de primeira classe, observou-se que o sulfato de alumínio apresentou um acréscimo de partículas nos minutos finais dos experimentos para G de 80 s^{-1} . Uma possível justificativa para tal ocorrência, seria justamente a relação entre o ganho de energia e o valor de eficiência máxima de floculação. Esta, para elevados valores de gradiente médio de velocidade, é atingida mais rapidamente. Uma vez atingido o tamanho máximo dos flocos, o mecanismo de ruptura prevalece formando flocos cada vez menores minimizando a eficiência, ou como neste caso, anulando o desempenho de floculação, visto que houve um aumento de partículas de primeira classe.

O cloreto férrico apresentou um comportamento das partículas dentro do esperado quanto a quantidade inicial e final das mesmas, embora seja observado uma diminuição abrupta da quantidade de partículas nos minutos iniciais seguida de um aumento nos minutos subsequentes do experimento, para os gradientes de 40 s^{-1} e 80 s^{-1} . Já o *PAC*, apresentou uma quantidade de partículas maior que a inicial, para alguns tempos de floculação dos gradientes de 30 e 40 s^{-1} , sendo que os demais gradientes apresentaram um comportamento esperado.

Salienta-se que o comportamento anômalo da relação entre a quantidade de partículas de primeira classe e o tempo de floculação com os diferentes gradientes médio de velocidade carece de mais investigações e sugere-se que seja pesquisado a quebra e reformação dos flocos relacionados sob a influência da água de baixa turbidez.

O estudo da cinética de floculação tendo por base as constantes de agregação e ruptura foi avaliada no tópico subsequente.

5.2.3 Obtenção das constantes cinéticas de agregação e ruptura para as partículas de primeira classe

De acordo os valores observados nas Tabelas 9, 10 e 11 foi considerado como número de partículas primárias, N_0 , a maior quantidade de partículas de primeira classe para cada coagulante empregado no estudo. Assim sendo, para o sulfato de alumínio o N_0 teve o valor de 9026, referente ao G de 80 s^{-1} e tempo de floculação de 3600 segundos. Para o cloreto férrico, N_0 foi de 4208, referente ao G de 80 s^{-1} e tempo de floculação de 60 segundos. E por fim, o *PAC* apresentou N_0 igual a 8011, referente ao G de 20 s^{-1} e tempo de floculação de 60 segundos. Tais valores foram utilizados para obter uma melhor descrição do comportamento das partículas de primeira classe quanto ao desempenho do processo de floculação.

As constantes cinéticas K_A e K_B foram obtidas, por meio de duas metodologias distintas de convergência não linear, conforme descrito no item 4.2.3.4, com intervalo de confiança de 95% e para todos os coagulantes empregados no presente trabalho. A primeira utilizou-se do

software *Origin 8.1* e obteve para o conjunto de todos os gradientes de velocidade médio o mesmo valor de K_A e K_B (Tabela 12).

Tabela 12 – Constantes cinéticas de agregação (K_A) e ruptura (K_B)

Constantes cinéticas de floculação	Sulfato de Alumínio		
	Sulfato de Alumínio	Cloreto Férrico	Policloreto de Alumínio
K_A	$4,09 \times 10^{-4} \pm 1,15 \times 10^{-4}$	$6,36 \times 10^{-4} \pm 2,15 \times 10^{-4}$	$4,11 \times 10^{-4} \pm 2,54 \times 10^{-4}$
K_B	$4,24 \times 10^{-6} \pm 1,35 \times 10^{-6}$	$3,13 \times 10^{-6} \pm 1,20 \times 10^{-6}$	$2,33 \times 10^{-6} \pm 1,74 \times 10^{-6}$

Fonte: Autor (2017)

Já a segunda metodologia utilizada, apresenta para cada gradiente de velocidade médio valores distintos das constantes de agregação e ruptura, conforme ilustrado pelas Tabelas 13, 14 e 15.

Tabela 13 – Constantes Cinéticas de agregação (K_A) e ruptura (K_B) para o Sulfato de Alumínio

Sulfato de Alumínio		
G (s^{-1})	K_A	K_B
20	$2,88 \times 10^{-4} \pm 1,84 \times 10^{-2}$	$3,02 \times 10^{-6} \pm 1,92 \times 10^{-4}$
30	$1,41 \times 10^{-4} \pm 9,02 \times 10^{-3}$	$1,62 \times 10^{-6} \pm 1,03 \times 10^{-4}$
40	$1,36 \times 10^{-4} \pm 8,66 \times 10^{-3}$	$9,75 \times 10^{-7} \pm 6,22 \times 10^{-5}$
80	$1,54 \times 10^{-4} \pm 9,84 \times 10^{-3}$	$9,87 \times 10^{-7} \pm 6,30 \times 10^{-5}$

Fonte: Autor (2017).

Tabela 14 – Constantes Cinéticas de agregação (K_A) e ruptura (K_B) para o Cloreto Férrico

Cloreto Férrico		
G (s⁻¹)	K_A	K_B
20	$3,27 \times 10^{-4} \pm 2,08 \times 10^{-2}$	$1,63 \times 10^{-6} \pm 1,04 \times 10^{-4}$
30	$2,20 \times 10^{-4} \pm 1,41 \times 10^{-2}$	$2,45 \times 10^{-6} \pm 1,57 \times 10^{-4}$
40	$2,74 \times 10^{-4} \pm 1,75 \times 10^{-2}$	$1,93 \times 10^{-6} \pm 1,23 \times 10^{-4}$
80	$2,46 \times 10^{-4} \pm 1,57 \times 10^{-2}$	$3,20 \times 10^{-7} \pm 2,04 \times 10^{-5}$

Fonte: Autor (2017).

Tabela 15 – Constantes Cinéticas de agregação (K_A) e ruptura (K_B) para o PAC

Policloreto de Alumínio		
G (s⁻¹)	K_A	K_B
20	$5,65 \times 10^{-4} \pm 3,60 \times 10^{-2}$	$4,53 \times 10^{-6} \pm 2,89 \times 10^{-4}$
30	$2,42 \times 10^{-4} \pm 1,55 \times 10^{-2}$	$1,96 \times 10^{-6} \pm 1,25 \times 10^{-4}$
40	$1,62 \times 10^{-4} \pm 1,03 \times 10^{-2}$	$1,14 \times 10^{-6} \pm 7,26 \times 10^{-5}$
80	$4,67 \times 10^{-4} \pm 2,98 \times 10^{-2}$	$8,32 \times 10^{-7} \pm 5,31 \times 10^{-5}$

Fonte: Autor (2017).

Nota-se que todos os valores de K_A e K_B obtidos, para ambos os métodos, possuem a mesma ordem de grandeza quando comparados com outros valores de constantes cinética observados em trabalhos recentes sobre o tema.

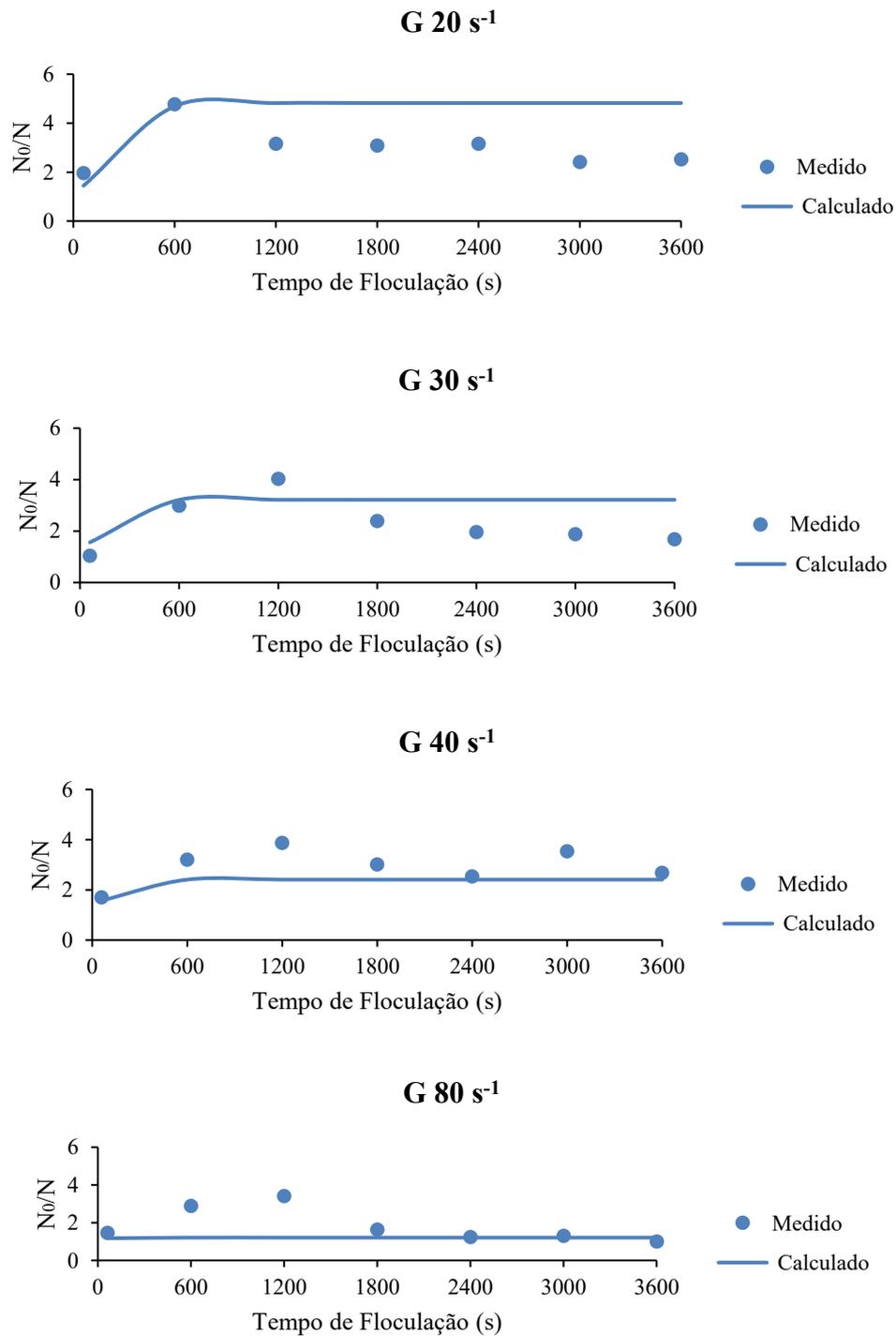
É válido lembrar, de acordo com Di Bernardo et al. (2005), que os valores de K_A e K_B são específicos para as características de cada sistema e, por esse motivo, deve-se evitar comparações mesmo que entre sistemas semelhantes.

Uma vez determinadas as constantes de agregação e ruptura para primeira classe de tamanho de partículas, e, os valores de tempo de floculação e gradiente médio de velocidade, utilizou-se

novamente a Equação (1) para a representação da curva do desempenho do processo de floculação para cada um dos gradientes de floculação estudados considerando-se cada um dos coagulantes.

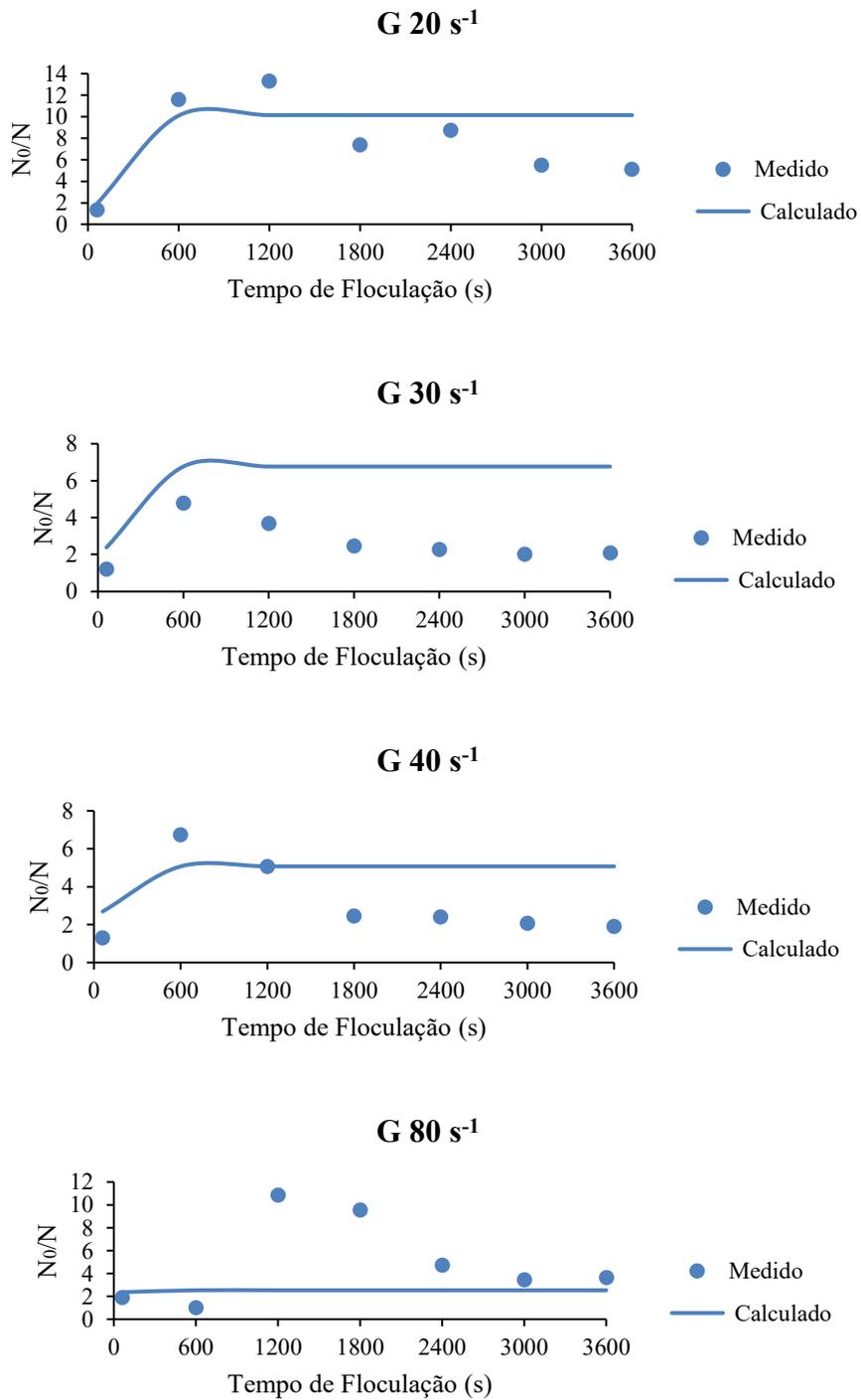
As Figuras 19, 20 e 21 ilustram as curvas de desempenho da floculação para os três coagulantes adotados no presente estudo, cujas constantes cinéticas de agregação (K_A) e ruptura (K_B) estão apresentadas na Tabela 12.

Figura 19 - Aplicação da Equação 1 para número de partículas de primeira classe, $K_A = 4,09 \times 10^{-4} \pm 1,15 \times 10^{-4}$ e $K_B = 4,24 \times 10^{-6} \pm 1,35 \times 10^{-6}$ para intervalo de confiança de 95% e sulfato de alumínio como coagulante.



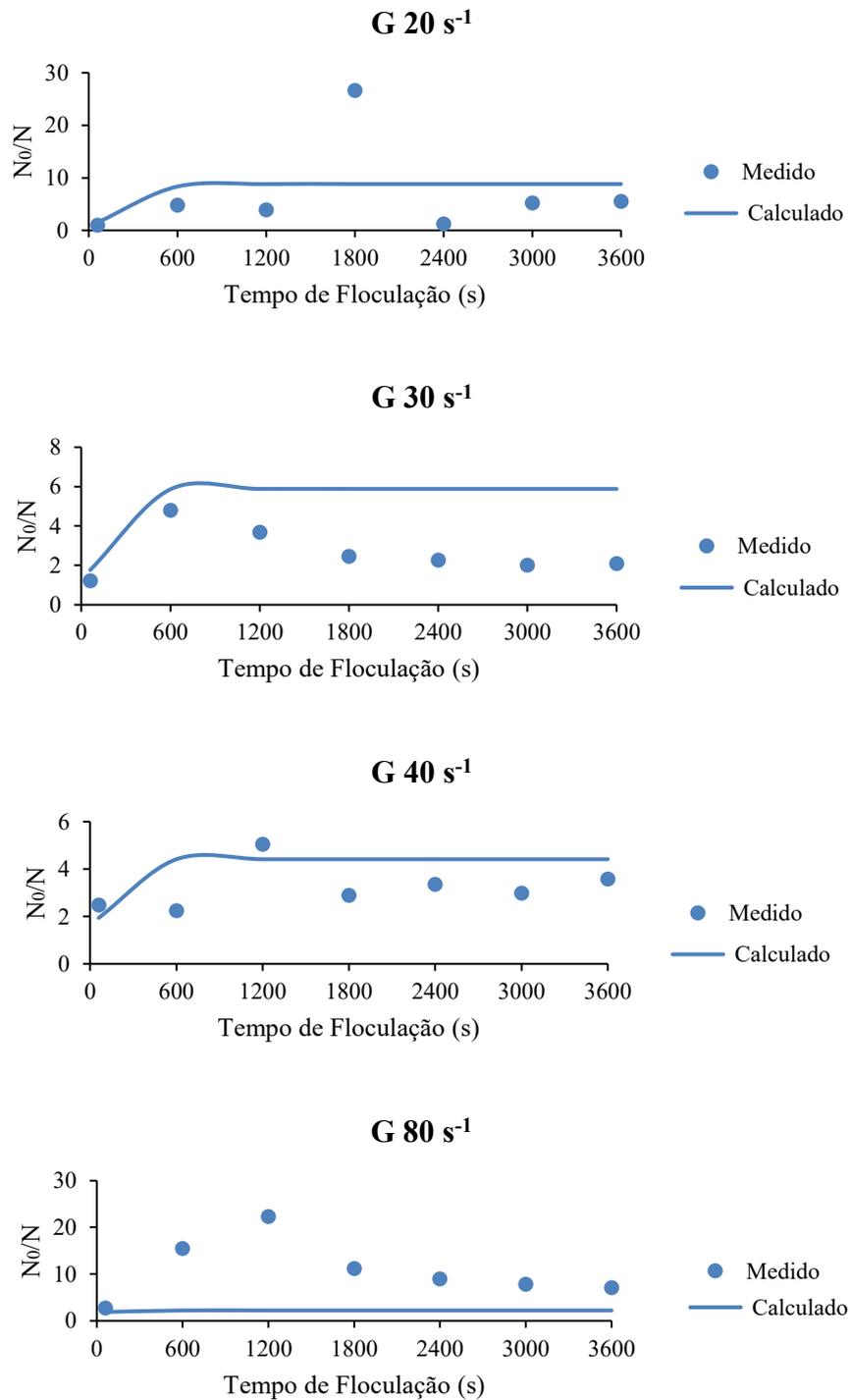
Fonte: Autor (2017)

Figura 20 - Aplicação da Equação 1 para número de partículas de primeira classe, $K_A = 6,36 \times 10^{-4} \pm 2,15 \times 10^{-4}$ e $K_B = 3,13 \times 10^{-6} \pm 1,20 \times 10^{-6}$ para intervalo de confiança de 95% e cloreto férrico como coagulante.



Fonte: Autor (2017)

Figura 21 - Aplicação da Equação 1 para número de partículas de primeira classe, $K_A = 4,11 \times 10^{-4} \pm 2,54 \times 10^{-4}$ e $K_B = 2,33 \times 10^{-6} \pm 1,74 \times 10^{-6}$ para intervalo de confiança de 95% e policloreto de alumínio como coagulante.



Fonte: Autor (2017)

Moruzzi e Oliveira (2013) observaram que a medida em que se aumenta o gradiente médio de velocidade observa-se uma maior taxa de ruptura dos flocos, que influencia no desempenho do processo de floculação.

Analisando-se a Figura 19, correspondente ao sulfato de alumínio como coagulante, constata-se a observação de Moruzzi e Oliveira (2013). O desempenho máximo ocorreu para o G de 20 s^{-1} logo nos primeiros minutos de floculação, seguida da tendência de equilíbrio das forças de agregação e ruptura a partir do instante de 10 minutos. À medida em que se aumentou a energia, menores foram os valores máximos de desempenho obtidos, sendo que para o G de 80 s^{-1} , o desempenho do processo de floculação diminuiu significativamente, resultando no menor patamar de equilíbrio de agregação e ruptura.

Pela Figura 20, correspondente ao cloreto férrico como coagulante, verificou-se que a afirmativa de Moruzzi e Oliveira (2013) foi observada apenas para os valores calculados, sendo observado o desempenho máximo para o G de 20 s^{-1} e para os demais gradientes uma diminuição gradativa do desempenho do processo de floculação. Para os valores de N_0/N obtidos experimentalmente, constatou-se maior eficiência para o G de 20 s^{-1} , no entanto, verificou-se um pior desempenho do processo de floculação para o G de 30 s^{-1} e não para o G de 80 s^{-1} como era esperado.

A Figura 21 mostra as curvas de desempenho do processo de floculação utilizando-se o *PAC* como coagulante, sendo que este apresentou comportamento semelhante ao do cloreto férrico, para valores medidos e calculados.

Outro ponto relevante para o estudo da cinética de floculação diz respeito a influência do tempo de floculação na formação dos flocos. Pelas figuras apresentadas anteriormente, para o G de 20 s^{-1} , percebe-se que para o sulfato de alumínio e para o *PAC* o desempenho máximo de floculação é alcançada logo aos 10 minutos, enquanto que para o cloreto férrico o desempenho

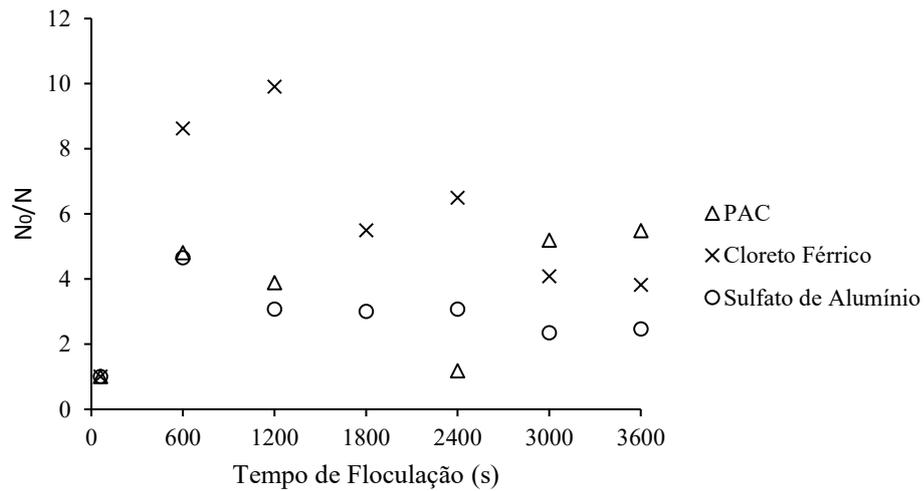
máximo é atingido próximo aos 20 minutos. Esta é uma informação importante que pode ser utilizada na operação de flocladores de *ETAs*.

Bratby (1981) afirma que com o aumento do G o estado estacionário é atingido mais rápido resultando em eficiências de floclação cada vez menores devido prevalecer o fenômeno de ruptura que interfere na sedimentabilidade das partículas. Tal fato pode ser comprovado pela análise da Figura 19, onde percebe-se, claramente, a diminuição do desempenho de floclação com aumento do gradiente de velocidade médio para o sulfato de alumínio. Dessa maneira, é notório a contribuição simultânea do G e do tempo de floclação para a obtenção do equilíbrio entre as taxas de agregação e ruptura, isto é, estabelecimento do estado estacionário.

É importante ressaltar que utilizando-se o sulfato de alumínio houve menor diferença no desempenho de floclação entre os valores medidos e calculados, seguido do cloreto férrico e do *PAC*. Dessa maneira, constata-se que para a primeira metodologia de análise utilizada no estudo, ou seja, com utilização do *software Origin*, o sulfato de alumínio apresentou resultados mais satisfatórios que os demais coagulantes.

Analisando o G igual a 20 s^{-1} , devido ser este o que apresenta maiores valores de desempenho, notou-se que o cloreto férrico apresentou maior eficiência de floclação quando comparado aos demais coagulantes. O sulfato de alumínio e o policloreto de alumínio apresentaram desempenho muito próximos, sendo que este apresentou ligeira superioridade comparado à aquele, conforme ilustrado na Figura 22.

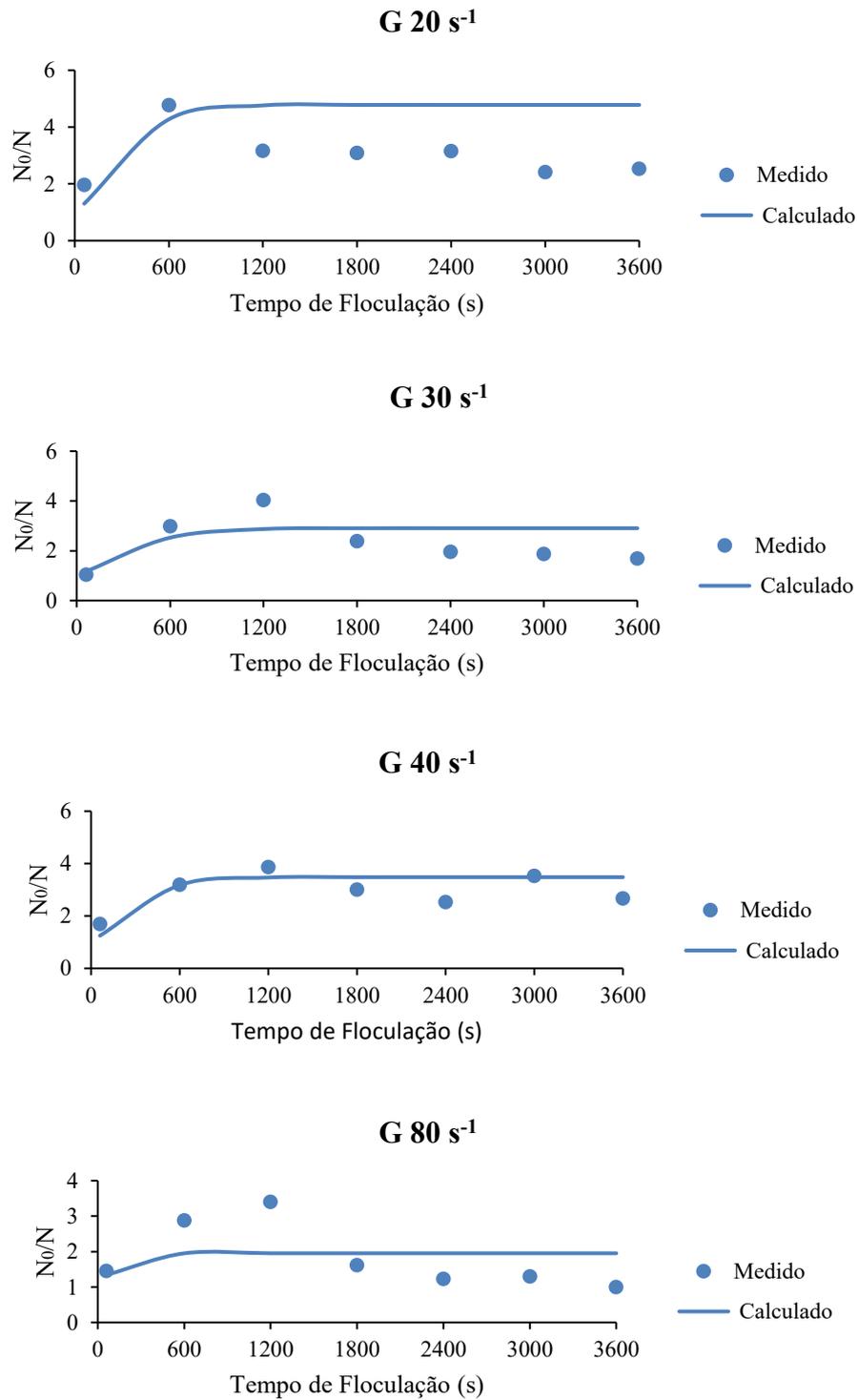
Figura 22 – Influência dos coagulantes na eficiência de floculação para o G de 20 s⁻¹



Fonte: Autor (2017).

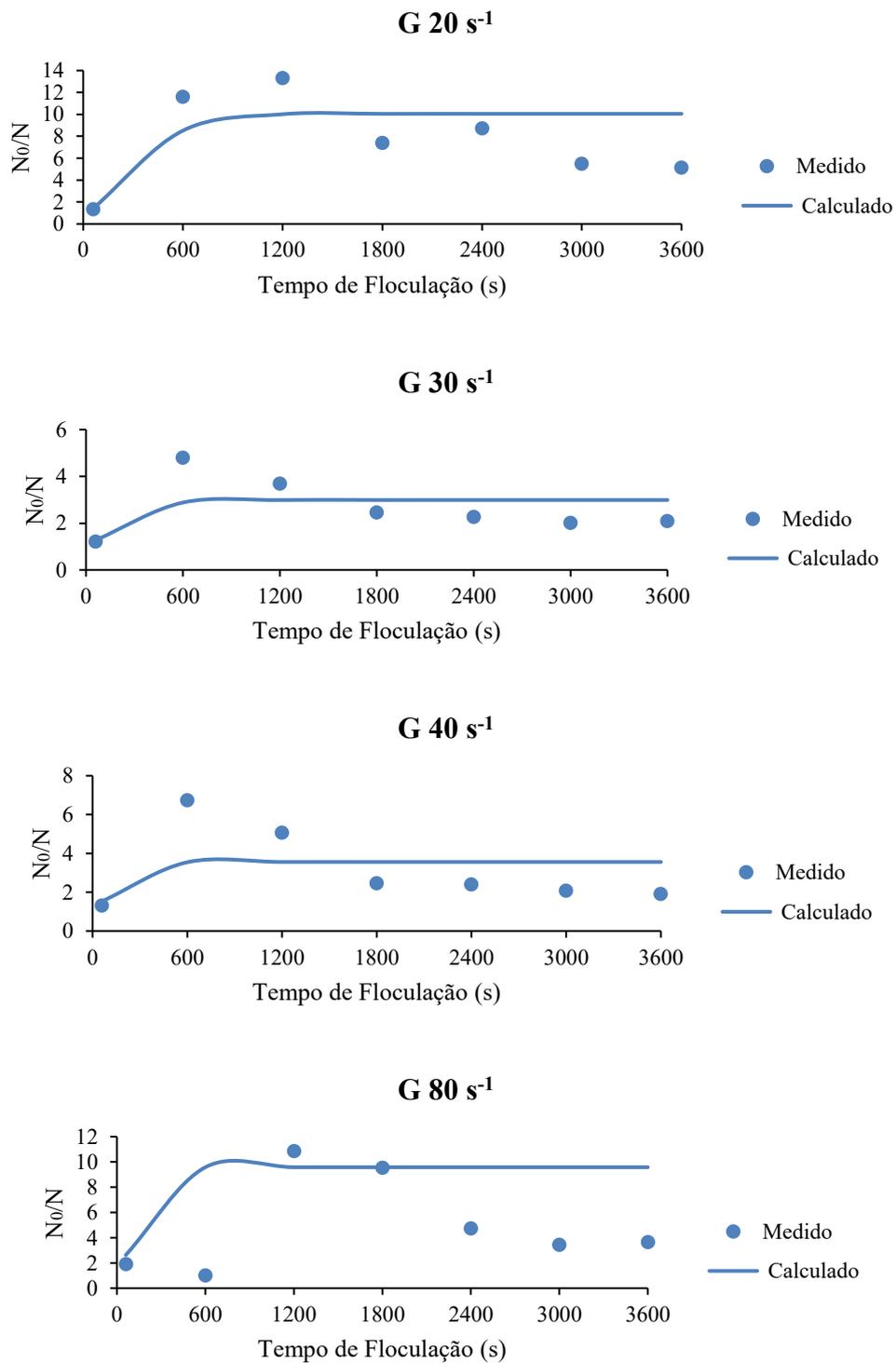
As Figuras 23, 24 e 25 ilustram as curvas de desempenho construídas a partir da utilização dos valores das constantes cinéticas de agregação (K_A) e ruptura (K_B) que foram apresentadas nas Tabelas 13, 14 e 15.

Figura 23 - Aplicação da Equação 1 com os dados apresentados na Tabela 12, para intervalo de confiança de 95% e sulfato de alumínio como coagulante.



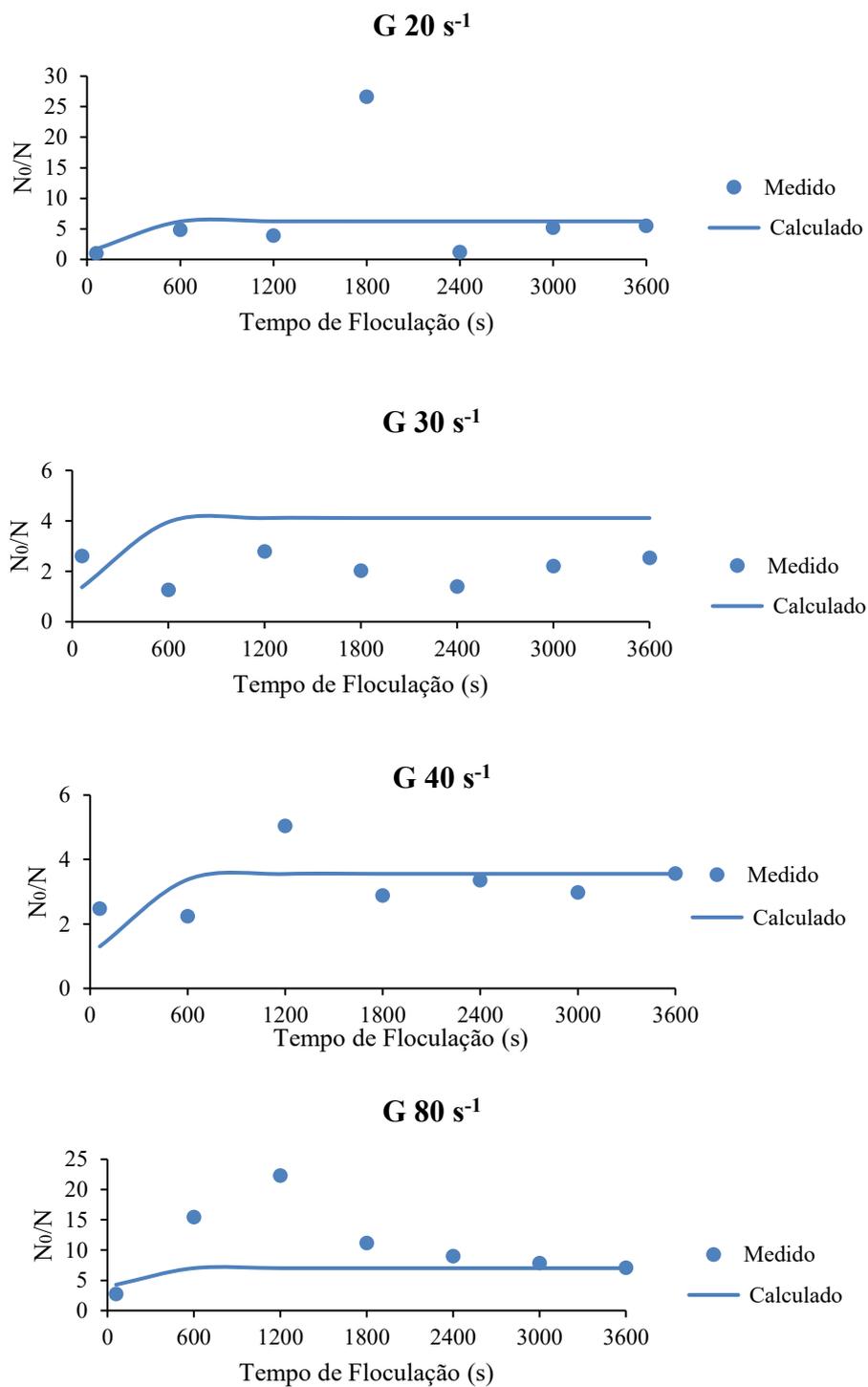
Fonte: Autor (2017)

Figura 24 - Aplicação da Equação 1 com os dados apresentados na Tabela 13, para intervalo de confiança de 95% e cloreto férrico como coagulante.



Fonte: Autor (2017)

Figura 25 - Aplicação da Equação 1 com os dados apresentados na Tabela 14, para intervalo de confiança de 95% e PAC como coagulante.



Fonte: Autor (2017)

A Figura 23 mostra que o sulfato de alumínio apresentou maior desempenho para o G de 20 s^{-1} e menor para o G de 80 s^{-1} .

Através da Figura 24, que retrata o comportamento do desempenho de floculação do cloreto férrico, verificou-se que, embora tenha apresentado maior valor de desempenho do processo de floculação para o G de 20 s^{-1} , o G de 30 s^{-1} apresentou a menor desempenho, sendo o mesmo, crescente para o G de 40 s^{-1} e G de 80 s^{-1} . Tal ocorrência anômala pode ser em função da não aplicabilidade da metodologia do estudo, o que carece de maior atenção em trabalhos futuros.

A Figura 25 traduz o comportamento do PAC quanto ao processo de desempenho de floculação, onde tal coagulante apresentou maior desempenho para o G de 80 s^{-1} , seguido do G de 20 s^{-1} , G igual a 30 s^{-1} e G de 40 s^{-1} . Pressupõe-se que a metodologia adotada no desenvolvimento do estudo não tenha sido adequada para o G de 80 s^{-1} do coagulante em questão, pois o resultado obtido experimentalmente não condiz com os valores de diversos estudos sobre o tema na literatura.

É possível atribuir a provável incoerência em alguns resultados obtidos à própria dinâmica do processo, ou, por se tratar de trabalho experimental, cujos erros inerentes ao processo vão além dos descritos neste texto, à questões metodológicas.

6 CONCLUSÕES

A utilização da técnica de análise de imagens para avaliação da influência das partículas primárias no desempenho da floculação, para águas de baixa turbidez, se mostrou eficaz como pode ser observado nas conclusões específicas a seguir:

- ✓ A aplicação da metodologia de aquisição e tratamento de imagens, desenvolvida por Moruzzi (2005), mostrou-se confiável devido aos erros verificados, considerados aceitáveis. Na etapa de aquisição das imagens a representatividade dessas, considerando todos os coagulantes adotados no estudo, apresentou erro relativo à média menor que

0,48% para um intervalo de confiança de 95%. Em relação a etapa de tratamento, observou-se que a escolha do limiar de binarização teve influência direta sobre parâmetros obtidos e que a resolução das imagens utilizada abordou todas as partículas primárias inerentes ao estudo, sendo o erro de resolução irrelevante.

- ✓ O aumento do valor do gradiente médio de velocidade acarretou em diminuição da eficiência de floculação.
- ✓ A tendência de equilíbrio entre as constantes de agregação e ruptura ocorreu logo nos primeiros minutos de floculação.
- ✓ Entre os três coagulantes testados, sob a ótica da investigação proposta neste trabalho, verificou-se que a utilização do cloreto férrico apresentou melhores resultados de desempenho do processo de floculação.
- ✓ Fora observado um comportamento anômalo entre a quantidade de partículas de primeira classe e o tempo de floculação para alguns valores de gradiente médio de velocidade, sobretudo nos minutos finais de floculação. Este comportamento carece de estudos mais detalhados para sua explicação.
- ✓ Na obtenção das constantes cinéticas de floculação observou-se que os valores encontrados possuem a mesma ordem de grandeza que os valores apresentados por Crittenden et al. (2012) e Di Bernardo et al. (2005).
- ✓ O uso da primeira classe de tamanho pode ser uma alternativa para o monitoramento direto do desempenho da floculação.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer desta pesquisa, foram encontrados diversos aspectos pertinentes ao tema central de estudo, passíveis de maiores investigações.

O comportamento anômalo entre a quantidade de partículas de primeira classe e o tempo de floculação para alguns valores de gradiente médio de velocidade, sobretudo nos minutos finais de floculação, carece de maior estudo acerca da quebra e reformação dos flocos relacionados sob a influência da água de baixa turbidez.

Efetuar a validação de ajuste para as calibrações realizadas nos modelos matemáticos adotados para obtenção das constantes cinéticas do estudo.

Outro aspecto importante é adequar as condições do ambiente de aquisição das imagens afim de se ter a menor interferência de luz externa durante a execução dos ensaios. Tal ação poderá beneficiar a qualidade das imagens obtidas e conseqüentemente a etapa de tratamento das imagens digitais e análise dos parâmetros de interesse.

Além disso, como a premissa básica deste trabalho é que as partículas de primeira classe podem ser utilizadas como representativas de partículas primárias do modelo estudado por Bratby et al. (1977), talvez haja necessidade de se ampliar a capacidade de captura de partículas de menor diâmetro, ou seja, partículas representadas por um menor número de partículas primárias.

8 REFERÊNCIAS

ARBOLEDA, J. *Teoria y Practica de la Purificación Del Agua*. In: **Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – ACODAL**, 1992, Colombia, 684p

ARGAMAN, Y. and KAUFMAN, W. J. (1970) *Turbulence and Flocculation*. **J. Sanit. Eng. Div. ASCE** **96**, 223.

ARMITHARAJAH, A.; Mills, K. M. *Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation*. **Journal of the American Water Works Association**, v.74, n, 04, p. 210-216, Apr, 1982.

BACHE, D. H.; JOHNSON, C.; MCGILLIAN, J. F.; Rasool, E. *A conceptual view of floc structure in the sweep floc domain*. **Water Science and Technology**. v.36, p. 49-56, 1997.

BACHE, D. H. and GREGORY, R. *Flocs and separation processes in drinking water treatment: a review*. **Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA**. v.59, n.1, 2010.

<https://doi.org/10.2166/aqua.2010.028>

BOUYER, D et al. *Experimental analysis of floc size distributions in a 1-L jar under different hydrodynamics and physicochemical conditions*. **Journal of Colloid and Interface Science**. v.292, p. 413-428, 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.06.011>

BRATBY, J et al. *Design of flocculation systems from batch test data*. **Water SA**. v.3, n. 4, p. 173-182, 1977.

BRATBY, J. *Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing and flocculation systems*. **Journal American Water Works Association**. v. 73, n. 6, p. 318-325, 1981.

BRITO, S.A. *Influência da Velocidade de Sedimentação na Determinação dos Coeficientes de Agregação e Ruptura Durante a Floculação*. *Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*, 189p. 1998.

CAMP, T.R. & STEIN, P.C. *Velocity gradients and internal work in fluid motion*. **Journal of the Boston Society of Civil Engineers**. v. 85, p. 219-237, 1943.

CHAKRABORTI, R.K. et al. *Characterization of Alum Floc by Image Analysis*. **Environmental Science e Technology**. v.34, n. 18, p.3969-3976, 2000.

<https://doi.org/10.1021/es990818o>

CHAKRABORTI, R.K. et al. *Changes in Fractal Dimension during aggregation*. **Water Research**. v.37, p.873-883, 2003.

[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00379-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00379-2)

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSEL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLIOUS, G.; BOCHARDT, J. H..MHW'S *Water Treatment: Principles and Design*. 3° Ed. 2012.1901p.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P.L. *Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*. São Carlos. RiMA. p.237, 2002.

DI BERNARDO, L. et al. *Tratamento de água para abastecimento por filtração direta*. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 1° Ed. v. 1, p. 498. Rio de Janeiro: Projeto PROSAB, RIMA, 2003.

DI BERNARDO, L. et al. *Uso de modelação matemática para projeto de câmaras mecanizadas de floculação em série em estações de tratamento de água*. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 82-90, 2005.
<https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000100010>

FRANCESCHI, M.; GENTY, D.; GIROU, A.; HUMBERT, L.; VERDIER, A. *Possibilities of the numerical treatment of images to assess quantitatively the morphological characters of flocs*. **Waste Management**. v.10, p.85-94, 1990.
[https://doi.org/10.1016/0956-053X\(90\)90112-X](https://doi.org/10.1016/0956-053X(90)90112-X)

GREGORY, J. *Optical monitoring of particle aggregates*. **Journal Environmental Sciences**. v.21, p.2-7, 2009.
[https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60002-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60002-4)

HAN, M.; KIM, T.; KIM, J. *Application of image analysis to evaluate the flocculation process*. **Journal of Water Supply: Research and Technology**, v. 55, n. 7-8, p. 452-459, Nov. 2006.
<https://doi.org/10.2166/aqua.2006.053>

JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; GREGORY, J. and PARSONS, S.A. *A Review of floc strength and breakage*. **Water Research**. v.39, p.3121-3137, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.022>

JUNKER, B. *Measurement of bubble and pellet size distributions: past and current image analysis technology*. **Bioprocess Biosyst Eng**. v. 29, p. 185-206, July 2006.
<https://doi.org/10.1007/s00449-006-0070-3>

Li, T.; ZHU, Z.; WANG, D.; YAO, C.; TANG, H. *Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanisms*. **Powder Technology**. v.168, p. 104-110, 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.07.003>

LIBÂNIO, M. *Avaliação da floculação em reatores estáticos e de escoamento contínuo com gradientes de velocidade constante e variável*. Tese de doutorado. **Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**. v.1, p.136, 1995.

M. YAO et al. *Effect of particle size distribution on turbidity under various water quality levels during flocculation processes*. **Desalination and Water Treatment**. v.354, p.116-124, 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.09.029>

MARQUES, R. DE O. and S. S. FERREIRA FILHO, S. S. *Flocculation kinetics of low turbidity raw water and the irreversible floc breakup process*. **Environmental Technology**. p.901-910, 2016.

MARQUES FILHO e VIEIRA NETO, H. *Processamento Digital de Imagens*. Rio de Janeiro: **Brasport**, 1999.

MORUZZI, R.B. *Avaliação da influência da distribuição do tamanho de partículas e do binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação do desempenho da flotação com utilização de sonda ultrassônica e técnica de análise por imagem*. Tese de doutorado. **Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**. v.1, p.240, 2005.

MORUZZI, R.B.; Reali, M.A.P. *Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas de flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital*. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.12, n.3, p. 273-283, 2007.

<https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000300007>

MORUZZI, R.B.; REALI, M.A.P. *Characterization of micro-bubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by anon-intrusive image analysis system and tracer tests*. **IWA Publishing 2010 WaterScience & Technology, WST**. v.61, n.1, p.253-262,2010.

<https://doi.org/10.2166/wst.2010.784>

MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, S. C. *Mathematical modeling and analysis of the flocculation process in chambers in series*. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 36, n. 3, p. 357-363, March. 2013.

MORUZZI, R.B et al. *Flocculation considerations from the classical analysis and from direct evaluation of particle size distribution*. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.21, p.1-8, August, 2016.

NAN, J. et al. *Impact of dynamic distribution of flocs particles on flocculation effect*. **Journal of Environmental Sciences**. v.21, p.1059-1065, 2009.

[https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62382-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62382-7)

NAN, J. and HE, W. *Characteristic analysis on morphological evolution of suspended particles in water during dynamic flocculation process*. **Desalination and Water Treatment**. v.41, p.35-44, 2012.

<https://doi.org/10.1080/19443994.2012.664676>

OLIVEIRA et al. *Evaluation of Particle Size Distribution in Hydro Collections*. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.20, n.4, p.1084-1092, 2015.

<https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p1084-1092>

PADILHA, A.J. *Processamento e Análise de Imagem*. 1998.

PÁDUA, V.L. *Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de flocação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de reatores estáticos*. Dissertação de Mestrado. **Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**. 1994.

PAVANELLI, G. *Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, flocação e sedimentação de água com cor e turbidez elevada*. Dissertação de mestrado. **Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**. v.1, p.213, 2001.

PRATSINIS, S.E.; Spicer, P.T. *Shear-induced flocculation: The evolution of floc structure and the shape of the size distribution ate steady-state*. **Elsevier Science. Water Research**. v.30, n5, p.1049-1056, 1996.

[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00253-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00253-7)

RAHMAN, M.N.; Rajendran, A.; Kariwala, V.; Asundi, A.K. *Effect of particle concentration and turbidity on particle characterization using digital holography*. **Chemical Engineering Research and Design**. v.92, n.2, p. 249-255, 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.012>

REN, P et al. *Analysis of floc morphology in a continuous-flow flocculation and sedimentation reactor*. **Journal of Environmental Sciences**. JES-00760, p. 1-8, 2016.

SANTOS, H. R. et al. *Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário*. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 9, n. 4, p. 291-300, out/dez 2004.

<https://doi.org/10.1590/S1413-41522004000400005>

SANTOS, E. P. C. C. et al. *Evaluating coagulation applied to direct downflowing filtration*. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.12, n 4, p.361-370,out/dez 2007.

<https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000400002>

SMOLUCHOWSKI, M. *Versucheiner Mathematischen Theorie der Koagulationskinetik kolloider LoÉ sungen*. **Z Phys Chem** 92:129-168, 1917.

SOUZA, T. e CORREIA, S. *Estudo de técnicas de realce de imagens digitais e suas aplicações. II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica*. João Pessoa/PB.2007.

SRIVASTAVA, V. C.; MALL, I. D.; MISHRA, I. M. *Treatment of pulp and paper mill wastewaters with poly aluminium chloride and bagasse fly ash. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. v. 260, p. 17-28, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.02.027>

THOMAS, D. N.; JUDD, S. J.; FAWCETT, N. *Flocculation modelling: a review. Water Research*, v.33, n, 07, p. 1579-1592, 1999.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00392-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00392-3)

VANDAMME, D et al. *Floc characteristics of Chlorella vulgaris: Influence of flocculation mode and presence of organic matter. Bioresource Technology*. v.151, p.383-387, 2014.

W.YU et al. *Effect of dosage strategy on Al-humic flocs grow and re-growth. Colloid and Surface A: Physicochem. Eng. Aspects*. v. 404, p. 106-111, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.04.033>

XIAO, F. et al. *PIV characterisation of flocculation dynamics and floc structure in water treatment. Colloid and Surface A: Physicochem. Eng. Aspects*. n. 1-3, v. 379, p. 27-35, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.11.053>

XU, W. et al. *Influence of pH on floc formation, breakage and fractal properties – The role of Al13 polymer. Journal of Water Sustainability*. v. 1, ed. 1, p. 45-57, jun. 2011.

YEPES, H. et al. *Classification of the porosity in thermally treated coals using a system of computer aided microscopy. Bol. Ciencias Tierra*. v.25, p. 81-92, 2009.

YUKSELEN, M. A. and Gregory, J. *The reversibility of floc breakage. International Journal of Mineral Processing*. v. 73, p. 251-259, 2004.
[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00077-2)

Z. YANG et al. *A new method for calculation of flocculation kinetics combining Smoluchowski model with fractal theory. Colloid and Surface A: Physicochem. Eng. Aspects*. v. 423, p. 11-19, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.01.058>